EXPRESS MAIL NO.
EV889129440US

(19)日本国特許庁（ＪＰ）　(12) **公表特許公報**（Ａ）　(11)特許出願公表番号
特表2003－533896
（P2003－533896A）
(43)公表日　平成15年11月11日(2003. 11. 11)

(51)Int.Cl.⁷	識別記号	ＦＩ	テーマコード*(参考)
Ｈ０１Ｌ　31/0232		Ｈ０１Ｌ　31/02	Ｄ　２Ｈ０４７
Ｇ０２Ｂ　6/122		Ｇ０２Ｂ　6/12	Ｂ　５Ｆ０８８

審査請求　未請求　　予備審査請求　有　　（全 43 頁）

(21)出願番号	特願2001－584913(P2001－584913)
(86)(22)出願日	平成13年５月８日(2001.5.8)
(85)翻訳文提出日	平成14年11月12日(2002.11.12)
(86)国際出願番号	ＰＣＴ／ＵＳ０１／１４７５６
(87)国際公開番号	ＷＯ０１／０８８５７７
(87)国際公開日	平成13年11月22日(2001.11.22)
(31)優先権主張番号	６０／２０３，８４６
(32)優先日	平成12年５月12日(2000.5.12)
(33)優先権主張国	米国（ＵＳ）
(31)優先権主張番号	０９／７１７，８５１
(32)優先日	平成12年11月21日(2000.11.21)
(33)優先権主張国	米国（ＵＳ）

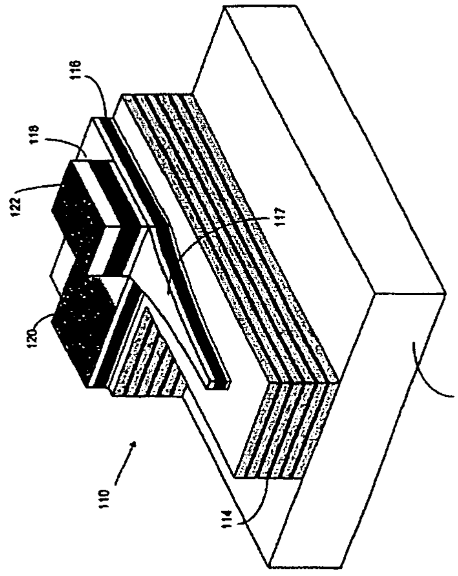
(71)出願人　ザ　トラスティーズ　オブ　プリンストン　ユニバーシテイ
アメリカ合衆国　ニュージャージー州，プリンストン，ニュー　サウス　ビルディング，フィフス　フロアー，ピー．オー．ボックス　36
(72)発明者　フォーレスト，スティーヴン・アール
アメリカ合衆国ニュージャージー州08540，プリンストン，ハント・ドライブ　148
(74)代理人　弁理士　社本　一夫　（外５名）

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　複数の非対称導波路を有する光子集積検出器

(57)【要約】

垂直方向に積層した２つ以上の非対称導波路を備えた光子集積回路（ＰＩＣ）を提供する。光検出ＰＩＣは、外部光ファイバとの結合損失を低く抑え、第１モードの光を主に案内する第１結合導波路（１１４）と、第１導波路（１１４）に垂直に結合し、第１モードとは異なる有効屈折率を有する第２モードの光を主に案内する第２導波路（１１６）と、第２導波路（１１６）に垂直に結合した光検出器（１１８）とを備えている。結合導波路において受光した光は、第２導波路の側面テーパ（１１７）を通って、第２導波路に移動する。光検出ＰＩＣは、光増幅器を有し、結合導波路と第２導波路との間に位置する第３導波路を、更に備えることもできる。



【特許請求の範囲】

【請求項１】　光信号に作用するデバイスであって、

主に第１モードの光を案内する第１導波路と、

主に第２モードの光を案内する第２導波路であって、該第２導波路は前記第１導波路に対して垂直方向に位置し、前記第１導波路および当該第２導波路間で前記第１モードの光を案内する側面テーパが形成され、前記第１モードの光の有効屈折率が前記第２モードの光のそれとは異なる、第２導波路と、

前記第２導波路内を伝搬する光を検出する光検出器であって、前記第２導波路に対して垂直方向に位置し、前記第２導波路によって前記第１導波路から分離されている、光検出器と、

を備えているデバイス。

【請求項２】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記第２モードの光の有効屈折率が前記第１モードのそれよりも大きい、デバイス。

【請求項３】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記側面テーパの幅が、第１地点において約１μｍであり、第２地点において約１．８ないし２．２μｍの間であり、前記第１地点および前記第２地点間における前記テーパの長さが約２５０および４００μｍの間である、デバイス。

【請求項４】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記側面テーパの長さが、約２５０ないし４００μｍの間であり、前記側面テーパの幅狭端の幅が約１μｍであり、前記側面テーパの幅が、前記側面テーパに沿った一地点において約１．８ないし２．２μｍの間である、デバイス。

【請求項５】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記側面テーパのテーパ角が約０．０５ないし０．０９度の間である、デバイス。

【請求項６】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記第１モードの光の有効屈折率が約３．１７３および３．１７７の間であり、前記第２モードの光の有効屈折率が約３．２ないし３．２２の間である、デバイス。

【請求項７】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記側面テーパが断熱テーパである、デバイス。

【請求項８】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記第１導波路の劈開フ

ァイバまたはレンズ化ファイバからの入力結合損失が、２ｄＢ未満である、デバイス。

【請求項９】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記第１導波路の遠視野像角度が、垂直方向および水平方向において約１３度ないし１８度の間である、デバイス。

【請求項１０】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記第２導波路は、前記第１導波路との結合損失が１ｄＢ未満であり、前記光検出器との吸収係数が、前記光検出器の３０μｍの範囲において８０％よりも大きい、デバイス。

【請求項１１】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記第２導波路は、更に、当該第２導波路内を伝搬する光を反射させ、２度目には前記光を前記検出器の下を伝搬させるようにした反射器を備えている、デバイス。

【請求項１２】　請求項１１記載のデバイスにおいて、前記反射器は金属被膜から成る、デバイス。

【請求項１３】　請求項１１記載のデバイスにおいて、前記反射器は誘電体スタックから成る、デバイス。

【請求項１４】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記光検出器はＰＩＮデバイスである、デバイス。

【請求項１５】　請求項１４記載のデバイスにおいて、前記ＰＩＮデバイスは、$In_{0.53}Ga_{0.47}As$吸収層を備えている、デバイス。

【請求項１６】　光信号に作用するデバイスであって、

主に第１モードの光を案内する第１導波路と、

主に第２モードの光を案内する第２導波路であって、該第２導波路は前記第１導波路に対して垂直方向に位置し、前記第１導波路および当該第２導波路間で前記第１モードの光を案内する側面テーパが形成され、前記第１モードの光の有効屈折率が前記第２モードの光のそれとは異なる、第２導波路と、

主に第３モードの光を案内する少なくとも１つの更に別の導波路であって、該更に別の導波路は、前記第２導波路に対して垂直に位置し、前記第２導波路によって前記第１導波路から分離され、前記第２導波路および当該更に別の導波路間で前記第２モードの光を案内する側面テーパが形成され、前記第３モードの光の

有効屈折率が前記第２モードの光のそれとは異なる、更に別の導波路と、
を備えているデバイス。

【請求項１７】　請求項１記載のデバイスにおいて、前記第２モードの光の有効屈折率が、前記第１モードのそれよりも大きい、デバイス。

【請求項１８】　請求項１７記載のデバイスにおいて、前記第３モードの光の有効屈折率が、前記第２モードのそれよりも大きい、デバイス。

【請求項１９】　請求項１６記載のデバイスにおいて、前記更に別の導波路における前記側面テーパは、前記第２導波路内の前記テーパにほぼ隣接して位置する、デバイス。

【請求項２０】　請求項１６記載のデバイスにおいて、前記更に別の導波路が光検出器である、デバイス。

【請求項２１】　請求項１６記載のデバイスであって、更に、前記更に別の導波路内を伝搬する光を検出する光検出器を備え、該光検出器が前記更に別の導波路に対して垂直に位置し、前記更に別の導波路によって前記第２導波路から分離されている、デバイス。

【請求項２２】　請求項２１記載のデバイスにおいて、前記第２導波路が光増幅器を備えている、デバイス。

【請求項２３】　請求項１６記載のデバイスにおいて、前記第１導波路、前記第２導波路、および前記第３導波路の内少なくとも１つを用いて、能動光子デバイスを形成する、デバイス。

【請求項２４】　請求項２３記載のデバイスにおいて、前記第１導波路、前記第２導波路、および前記第３導波路の内少なくとも１つを用いて、受動光子デバイスを形成する、デバイス。

【請求項２５】　光信号に作用する検出器であって、

主に第１モードの光を案内する第１導波路と、

主に第２モードの光を案内する第２導波路であって、該第２導波路は前記第１導波路に対して垂直方向に位置し、前記第１導波路および当該第２導波路間で前記第１モードの光を案内する側面テーパが形成され、前記第１モードの光の有効屈折率が前記第２モードの光のそれとは異なる、第２導波路と、

主に第３モードの光を案内する少なくとも１つの更に別の導波路であって、該更に別の導波路は、前記第２導波路に対して垂直に位置し、前記第２導波路によって前記第１導波路から分離され、前記第２導波路および当該更に別の導波路間で前記第２モードの光を案内する側面テーパが形成され、前記第３モードの光の有効屈折率が前記第２モードの光のそれとは異なる、更に別の導波路と、

前記更に別の導波路内を伝搬する光を検出する光検出器であって、前記更に別の導波路に対して垂直に位置し、前記更に別の導波路によって前記第２導波路から分離されている、光検出器と、

を備えている検出器。

【請求項２６】　請求項２５記載の検出器において、前記第２導波路が光増幅器を備えている、検出器。

【請求項２７】　請求項２５記載の検出器において、前記光検出器がＰＩＮデバイスである、検出器。

【請求項２８】　光信号に作用するデバイスであって、

主に第１モードの光を案内する第１導波路と、

主に第２モードの光を案内する第２導波路であって、該第２導波路は前記第１導波路に対して垂直方向に位置し、前記第１導波路および当該第２導波路間で前記第１モードの光を案内する側面テーパが形成され、前記第１モードの光の有効屈折率が前記第２モードの光のそれとは異なり、前記光信号を増幅する光増幅器を備えている、第２導波路と、

主に第３モードの光を案内する少なくとも１つの更に別の導波路であって、該更に別の導波路は、前記第２導波路に対して垂直に位置し、前記第２導波路によって前記第１導波路から分離され、前記第２導波路および当該更に別の導波路間で前記第２モードの光を案内する側面テーパが形成され、前記第３モードの光の有効屈折率が前記第２モードの光のそれとは異なる、更に別の導波路と、

前記更に別の導波路内を伝搬する光を検出する光検出器であって、前記更に別の導波路に対して垂直に位置し、前記更に別の導波路によって前記第２導波路から分離されている、光検出器と、

を備えているデバイス。

【請求項２９】　請求項２８記載のデバイスにおいて、前記第２モードの光の有効屈折率が、前記第１モードのそれよりも大きい、デバイス。

【請求項３０】　請求項２９記載のデバイスにおいて、前記第３モードの光の有効屈折率が、前記第２モードのそれよりも大きい、デバイス。

【請求項３１】　請求項３０記載のデバイスにおいて、前記第１モードの光の前記第１導波路における有効屈折率は約３．２であり、前記第２モードの光の前記第２導波路における有効屈折率は約３．３２であり、前記第３モードの光の前記更に別の導波路における有効屈折率は約３．３７である、デバイス。

【請求項３２】　請求項２８記載のデバイスにおいて、前記第１導波路は、劈開ファイバまたはレンズ化ファイバからの入力結合損失が約２ｄＢ未満である、デバイス。

【請求項３３】　請求項２８記載のデバイスにおいて、前記第１導波路の遠視野像角度が、垂直方向および水平方向において約１３度ないし１８度の間である、デバイス。

【請求項３４】　請求項２８記載のデバイスにおいて、前記更に別の導波路は、前記第２導波路との結合損失が１ｄＢ未満であり、前記光検出器との吸収係数が、前記光検出器の３０μｍの範囲において８０％よりも大きい、デバイス。

【請求項３５】　請求項２８記載のデバイスにおいて、前記第２導波路は、更に、当該第２導波路内を伝搬する光を反射させ、２度目には前記光を前記検出器の下を伝搬させるようにした反射器を備える、デバイス。

【請求項３６】　請求項２８記載のデバイスにおいて、前記第２導波路は、前記第２モードの光に対して約２０ｄｂまでの利得を与える、デバイス。

【請求項３７】　請求項２８記載のデバイスであって、更に、前記第２モードの光を濾過し、前記第２モードの光を前記更に別の導波路に結合する前に、増幅自発放出を除去する格子フィルタを備えている、デバイス。

【請求項３８】　請求項３７記載のデバイスにおいて、前記格子フィルタが平行カプラ格子フィルタである、デバイス。

【請求項３９】　請求項３７記載のデバイスにおいて、前記格子フィルタが直線格子フィルタである、デバイス。

【請求項４０】　請求項３７記載のデバイスにおいて、前記格子フィルタは、特定の波長の光を前記更に別の導波路に入射させるように調節可能である、デバイス。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

（関連出願）

本願の主題は、２０００年５月１２日出願の"Twin Waveguide Based Design for Photonic Integrated Circuits"（二重導波路に基づく光子集積回路の設計）と題する米国仮特許出願第６０／２０３，８４６号と関連があり、その内容はこの言及により全体が本願にも含まれることとする。

【０００２】

（発明の分野）

本発明は、一般的に、光通信デバイスの分野に関し、更に特定すれば、光子集積回路に関する。

【０００３】

（発明の背景）

光子集積回路（ＰＩＣ：photonic integrated circuit）は、集積技術の一基礎をなし、複雑な光回路を形成するために増々用いられている。ＰＩＣ技術により、能動的および受動的双方の光デバイスを、単一の基板上に一体化することが可能となる。例えば、ＰＩＣは、集積レーザ、集積受信器、導波路、検出器、半導体光増幅器（ＳＯＡ：semiconductor optical amplifier）、ならびにそのほかの能動および受動半導体光デバイスを構成することができる。ＰＩＣにおいて能動および受動デバイスをモノリシックに一体化することにより、光通信に用いられる効果的な集積技術の基礎が得られる。

【０００４】

特に多様性が高いＰＩＣ基礎技術の１つに、集積二重導波路（ＴＧ：twin waveguide）構造がある。二重導波路は、消散場結合(evanescent field coupling)を用いて、垂直指向カプラの形状寸法内に能動導波路および受動導波路を組み合わせる。ＴＧ構造では、能動および受動デバイスを積層し製作する構造を形成するには、単一のエピタキシャル成長段部だけがあればよい。即ち、ＴＧがもたらす基礎技術では、各々異なるレイアウトおよび構成要素を有する種々のＰＩＣを、同一の母材ウエハから作成することが可能となる。成長後のパターニングを行

って、集積した構成要素を規定するため、エピタキシャル再成長の必要性がない。加えて、ＴＧ系ＰＩＣにおける能動および受動構成要素は、成長後の処理ステップにおいてＰＩＣ上でのデバイスの位置および種類を決定することによって、別個に最適化することができる。

【０００５】

しかしながら、従来のＴＧ構造には、光モード間の相互作用のために、導波路結合がデバイスの長さに強く依存するという欠点があった。レーザのようなＰＩＣデバイスでは、光モード間の相互作用のために、レーザ発生閾値電流や受動導波路への結合を制御することができなくなってしまう。これは、デバイス構造自体におけるばらつきに対する感度によるものである。感度のばらつきは、従来のＴＧ構造における伝搬の偶数および奇数モード間の相互作用によって生ずる。この相互作用から、レーザ空乏内における構造的および破壊的干渉が生じ、デバイスの閾値電流、モード利得、結合効率、および出力結合パラメータに影響を及ぼす。また、従来のＴＧ構造では、デバイスの長さ、偶数／奇数モードの相互作用、および積層構造におけるばらつきのために、性能特性における感度の不安定という問題もある。

【０００６】

非対称二重導波路（ＡＴＧ：asymmetric twin waveguide）と呼ばれる、改良型ＴＧ構造が、１９９９年６月２２日出願の"Twin Waveguide Based Design for Photonic Integrated Circuits"（二重導波路に基づく光子集積回路の設計）と題する米国特許出願第０９，３３７，７８５号に開示されている。その内容は、この言及により全体が本願にも含まれることとする。これは、従来のＴＧ構造の性能上の問題の一部について取り組んでいる。ＡＴＧ構造は、異なるモードの光が異なる導波路内でのみ伝搬するように制限することにより、モード干渉を大幅に減少させる。これを達成するには、二重導波路内に含まれる単一モード導波路の各々を設計する際に、２つの導波路の各々を伝搬する光のモードが異なる有効屈折率を有するようにする。非対称導波路の側面を漸減させれば、第１および第２導波路間の光エネルギの共振または断熱(adiabatic)結合による結合損失を減少させることができる。非対称導波路の設計により、光モード間の相互作用が大

幅に減少し、したがって従来のＴＧデバイスよりも著しく改善されたことが示される。

【０００７】

ＡＴＧが多様な基礎技術となることは確実である。実際、IEEE Photonic Technology Letters の第１１巻、第９号（１９９９年９月）に発表された"Efficient Coupling in Integrated Twin-Waveguide Lasers Using Waveguide Tapers"（導波路テーパを用いた集積二重導波路レーザにおける効率的な結合）と題する論文において、本発明者らは、導波路を用いてレーザを集積する設計を提案している。その内容は、この言及により本願にも含まれることとする。更に、IEEE Photonic Tech. Lettersの第１２巻、第５号（２０００年５月）に発表された"Asymmetric Twin-Waveguide 1.55-μm Wavelength Laser with a Distributed Bragg Reflector"（分散ブラッグ反射器を有する非対称二重導波路１．５５μm波長レーザ）と題する論文において、本発明者らは、非対称二重導波路設計に基づくレーザ・デバイスの設計について開示している。その内容は、この言及により本願にも含まれることとする。

【０００８】

これらの開発においては、ＡＴＧ設計に対する将来性が示されているが、複雑な回路を開発する必要性がなおも残っている。これは強く求められることが多いが、今日までＰＩＣ技術では実現していない。即ち、能動および受動双方を含む多数の光デバイスを単一の基板上に組み合わせるためのＰＩＣ基礎の改良が求められている。更に特定すれば、FiberSystems Internationalの２０００年６／７月号に発表された、"Manufacturers Focus on the 40 Gbit/s Challenge"（製造業者の目標は４０Ｇｂｉｔ／ｓへの挑戦）と題するNisa HhanおよびJim Rueによる論文に記載されているように、当技術分野には、高速検出器のような集積光子デバイスを改良することも求められている。この論文の内容は、先の言及により、本願にも含まれることとする。更に、光－光増幅器(photo-optical amplifier)を検出器と一体化し、検出器の応答性を高めることも求められている。

【０００９】

（発明の摘要）

端的に言えば、本発明は、当技術分野におけるこれらおよびその他の要望に答えるものである。

【００１０】

本発明の第１の態様によれば、非対称二重導波路光検出デバイスを提供する。光検出ＰＩＣは、外部光ファイバとの結合損失を低く抑え、第１モードの光を主に案内する第１結合導波路と、第１導波路に垂直に結合し、第１モードとは異なる有効屈折率を有する第２モードの光を主に案内する第２導波路と、第２導波路に垂直に結合した光検出器とを備えている。結合導波路において受光した光は、第２導波路の側面テーパを通って、第２導波路に移動する。第２導波路に隣接する光検出デバイスは、消散結合によって、第２導波路内を伝搬する光を受光する。

【００１１】

本発明の別の態様によれば、垂直方向に積層した非対称導波路を２つよりも多く備えたＰＩＣデバイスを提供する。非対称導波路を２つよりも多く有するＰＩＣデバイスは、単一ウエハにおいて、様々な種類のデバイスを一体化可能にする。例えば、１つの導波路を別のデバイスとの結合に用い、第２導波路を信号増幅に用い、更に別の導波路を、増幅信号を別のデバイスに伝達するために用いることができる。２つを超えて非対称導波路の数を増加させると、考案可能なデバイスの数および種類が大幅に増える。

【００１２】

本発明の別の態様によれば、垂直方向に積層した非対称導波路を２つよりも多く備えたＰＩＣデバイスの一実施形態を開示する。即ち、非対称導波路に基づき、光増幅器を内部に一体化した光検出デバイスを提供する。この光検出デバイスは、外部光ファイバとの結合損失を低く抑え、第１モードの光を主に案内するように設計した結合導波路と、第１導波路よりも高い有効屈折率を有する第２モードの光を主に案内および増幅する第２導波路と、第２モードの光よりも高い有効屈折率を有する第３モードの光を主に案内する第３導波路と、第３導波路に消散的に結合した光検出器とを備えている。増幅／光検出ＰＩＣでは、光が結合導波路に入射し、側面テーパを通って、光増幅器を備えた第２導波路に結合する。第

２導波路の長さにわたって光を増幅し、第２側面テーパを通って第３導波路に結合する。第３導波路内を伝搬している間に、第３導波路に消散的に結合されている光検出器によって光が吸収される。この増幅／光検出デバイスは、垂直方向に積層した非対称導波路を２つよりも多く用いて考案可能な多くの種類のデバイスの１つに過ぎない。

【００１３】

本発明による光検出器および増幅器／光検出器は、受信器の応答性を格段に向上させる。実際、本発明による検出器は、少なくとも４０ＧＨｚまでのレートで伝送する光信号を受信するように動作可能である。更に、検出器は、製造中に生ずるばらつきにも耐性がある。したがって、本発明による光検出器および増幅／光検出器は、商用光通信における使用に特に適している。

【００１４】

本発明のその他の態様については、以下で詳細に説明する。

【００１５】

（図面の簡単な説明）

本発明のその他の特徴は、現時点における本発明の好適な実施形態例について、添付図面に関連付けて行う以下の詳細な説明から、一層明白となろう。

【００１６】

（発明の詳細な説明）

図１ないし図１３を参照しながら、本発明による現時点における好適な実施形態例による、前述の効果的な特徴を有するシステムおよび方法について以下に説明する。当業者には認められようが、これらの図面に関してここで与える説明は、例示のみを目的とするのであり、本発明の範囲を限定する意図は全くない。本発明の範囲に関する質問は全て、添付した特許請求の範囲を参照することによって解明することができる。

【００１７】

概して言えば、本願は、モノリシックに集積した非対称導波路構造を対称とする。非対称二重導波路（ＡＴＧ）の設計については、１９９９年６月２２日出願の"Twin Waveguide Based Design for Photonic Integrated Circuits"（二重導

波路に基づく光子集積回路の設計）と題する米国特許出願第０９／３３７，７８５号に開示されている。その内容は、この言及により、全体が本願にも含まれることとする。一般に、ＡＴＧ設計は２つの導波路を用い、各導波路は、１つのモードの光を主に案内するように設計されており、各モードは異なる有効屈折率を有する。導波路の一方における側面テーパが、導波路間における光の結合を誘発する。側面テーパは、第１導波路内を移動するあるモードの光の有効屈折率を、主に第２導波路内を伝搬する第２モードに変化させる。この遷移は、テーパの長さに沿って生じる。したがって、第１屈折率を有するモードの光は、テーパの開始点において第２導波路内で伝搬し始め、テーパ領域の終点までに、有効屈折率が高い第２モードの光に遷移することができる。これによって、このモードを本質的に第２導波路内で伝搬するように固定することになる。

【００１８】

本願は、側面テーパを形成した、複数の垂直集積導波路を有するＰＩＣデバイスを対象とする。本発明の第１の態様によれば、複数の導波路の１つに消散的に結合した光検出器を有する光検出ＰＩＣを提供する。第１導波路において受光した光は、第２導波路内の側面テーパを通って、第２導波路内に結合する。第２導波路上にある光検出デバイスが、消散的結合によって、第２導波路内を伝搬する光を受光する。こうして、第２導波路に消散的に結合した検出器によって、第１導波路で受光した光を検出する。

【００１９】

図１Ａは、本発明の一態様による光検出デバイスの一例の斜視図を示す。図示のように、モノリシックに集積した光検出ＰＩＣ１１０が基板１１２上に位置し、第１導波路１１４、第２導波路１１６、および検出器１１８を備えている。光検出ＰＩＣ１１０は、更に、ｎコンタクト１２０およびｐコンタクト１２２を備えている。導波路１１４は、レンズ化(lensed)または劈開(cleaved)した単一モード光ファイバからの結合損失を低く抑えるように設計されている。実施形態の一例では、導波路１１４およびレンズ化または劈開光ファイバ間の結合損失は２ｄＢ未満である。更に、導波路１１４の遠視野像角度は、垂直および水平方向双方において、約１３度ないし１８度の間である。実施形態の一例では、導波路１

１４を構成する材料、およびこれら材料の相対的な厚さは、導波路１１４内で主に伝搬する光のモードが約３．１７３ないし３．１７７の間の有効屈折率を有するように、選択する。

【００２０】

導波路１１６は、導波路１１４上に位置し、これと一体的に形成されている。導波路１１６は、主に一方のモードの光を案内するように設計されており、このモードの光は、導波路１１４内を伝搬するモードの光よりも、有効屈折率が大きい。実施形態の一例では、導波路１１６内を伝搬するモードの光は、有効屈折率が約３．２ないし３．２２の間である。導波路１１６は、導波路１１４から導波路１１６への光の結合を改善するために側面テーパ・エリア１１７を有している。実施形態の一例では、導波路１１４および導波路１１６間の結合損失は１ｄＢ未満である。

【００２１】

検出器１１８は、導波路１１６上に位置し、これと一体的に形成されている。実施形態の一例では、検出器１１８は、ｐ＋クラッディング層、ｎ＋整合層、およびＩｎＧａＡｓ吸収層から成る、ＰＩＮ型検出器である。実施形態の一例では、８０％よりも多い光が光検出器の約３０μｍの範囲で吸収されるように、導波路１１６および検出器１１８間の吸収係数を設定する。尚、実施形態の一例では、検出器１１８が導波路１１６とは別個となっているが、検出器１１８を導波路１１６内に一体化してもよいことを注記しておく。

【００２２】

光は、導波路１１４を通って光検出ＰＩＣ１１０に入射する。導波路１１４は、例えば、光ファイバのような、他のデバイスに結合することができる。少なくとも第１モードの光が導波路１１４を通って伝搬し、導波路１１６のテーパ部１１７に到達すると、導波路１１６内を伝搬し始める。第１モードの有効屈折率は、テーパ領域１１７の長さにわたって増大する。その結果、テーパ領域１１７の幅広端に到達すると、テーパ内を伝搬した光は第２モードの光に遷移する。第２モードの光は主に導波路１１６内に制限される。主に導波路１１６内を伝搬する第２モードの光は、検出器１１８に消散的に結合される。検出器１１８の長さに

わたって、十分な量の消散場(evanescent field)を吸収し、導波路１１７内における光の存在を効果的に特定することができる。

【００２３】

図１Ｂは、光検出デバイス１１０の一実施形態の斜視図である。図示のように、光検出デバイス１１０は、更に反射器１３０を備えることができる。反射器１３０は、導波路１１４および１１６に隣接して位置し、そこに入射した光を反射するように動作する。したがって、導波路１１４内を伝搬した光の内、最初の通過時に検出器１１８において吸収されなかった光は、反射して導波路１１４内に戻り、２回目の通過中に検出器１１８の下で吸収することができる。光が２回目に検出器１１８の下を通過するようにしたことにより、反射器１３０は潜在的にデバイス１１０の応答性を高める。更に、反射器１３０によって検出器１１８の下で光が２回通過するようにしたので、検出器１１８を物理的に小型化でき、しかも同じレベルの応答性を備えることができる。反射器１３０は、例えば、金または銀のような反射性金属で構成するとよい。また、反射器１３０は、誘電体スタックで構成してもよい。

【００２４】

本発明による非対称導波路検出器は、結合損失を最少に抑え、偏光感度(polarization sensitivity)を低く抑えたことを特徴とする。実際、検出器の応答性は偏光に大きく依存する。本発明では、これらの特徴は、部分的に、導波路の物理的な組成の関数である。

【００２５】

図２は、光検出ＰＩＣ１１０の断面図の一例を示す。図示のように、ＰＩＣ１１０は、半絶縁、即ち、ドープＩｎＰ基板１１２上に成長する。結合導波路１１４は、厚さ０．５５μｍの６つのＩｎＰ層２１２の間に分散させた、厚さ５００オングストロームの５つのＩｎＧａＡｓＰ（バンドギャップE_g＝１．０３ｅＶ）層２１０から成る。導波路１１４の組成を設計するに際して、導波路１１４内を主に伝搬するモードの光が約３．１７３ないし３．１７７の間の有効反射率を有するようにした。

【００２６】

導波路１１６は、０．２５ないし０．２９μｍの間の厚さを有する中央ＩｎＧａＡｓＰ層２１４を備えている。更に、導波路１１６は、中央層２１４の各側にある、２つの３００ÅＩｎＧａＡｓＰ層２１６を備え、その各々は、２つの９００ÅのＩｎＰ層２１８の間に位置する。導波路１１６を設計する際に、導波路１１６内を主に伝搬するモードの光が約３．２ないし３．２２の有効屈折率を有するようにした。ＰＩＣ１１０の非対称設計によれば、層２１４、２１６、および２１８によって、導波路１１６内を主に伝搬する光のモードは、導波路１１４内を主に伝搬するモードの光よりも高い有効屈折率を有することになる。

【００２７】

導波路１１６とＰＩＮ検出器１１８との間に、厚さ０．１５μｍのｎ－ドープ層２２０を配置し、消散結合および吸収を増大させる。ＰＩＮ検出器１１８は、厚さが約０．１ないし０．３μｍの間であるｎ－ドープ層２２２、厚さが約０．５ないし０．６μｍの間であるＩｎ$_{0.53}$Ｇａ$_{0.47}$Ａｓ吸収層２２４、および厚さが約０．６μｍであるｐ－ドープＩｎＰ層２２６から成る。他の実施形態では、ＰＩＮ構造におけるドーピング層の極性を逆にして、Ｐ＋下位層、非ドープＩｎＧａＡｓ層、および上位ｎ＋層を形成してもよいことを、当業者は認めよう。

【００２８】

本発明によって得られる低結合損失および低偏光感度は、側面テーパ１１７の関数でもある。加えて、本発明による側面テーパは、製造欠陥に伴う幅のばらつきに対しても耐性がある。例えば１ｍｍというような比較的長い範囲(length)にわたって、ゆっくりとまたは断熱的に幅が変化する側面テーパは、このような特性を呈することができる。しかしながら、本発明者らは、大幅に短い範囲(proportion)、即ち、約２５０ないし４００μｍの間の側面テーパを用いて、低結合損失、低偏光感度、および製造欠陥に対する耐性をもたらす、非対称導波路設計を発案した。

【００２９】

図３は、光検出ＰＩＣ１１０の上面図を示す。この実施形態の一例では、結合導波路１１４の幅を５μｍとする。この幅をここではW_{FIB}と呼ぶ。導波路１１６のテーパ端の幅を１μｍとする。この幅をここではW_{TAPEND}と呼ぶ。この実施

形態の一例ではテーパの最も広い地点である、一地点におけるテーパの幅を約１．８ないし２．２μmの間とする。この幅をここではW_{TAP}と呼ぶ。W_{TAPEND}、W_{TAP}、およびL_{TAP}に前述の値を採用すると、側面テーパの角度θは、約０．０５ないし０．０９度の間となる。検出器１１８の長さは、約２０ないし５０μmの間である。この長さをここではL_{DET}と呼ぶ。

【００３０】

光検出ＰＩＮ１１０は、一連のマスキングおよびエッチング工程によって製造する。図４は、本発明の一態様にしたがって光検出ＰＩＮを製造するプロセスのフローチャートを示す。図示のように、ステップ４１０において、図２を参照しながら先に説明した層から成るモノリシック構造を、分子ビーム・エピタキシ（ＭＢＥ）または金属有機化学蒸着（ＭＯＣＶＤ）によって、例えば、単一のエピタキシャル工程でＩｎＰ基板１１２上に成長させる。ステップ４１２において、マスキングによって検出器１１２の輪郭を規定し、エッチングによって周囲の層を導波路１１６の上面まで除去する。ステップ４１４において、マスキングによって側面テーパ１１７を有する導波路１１６を規定し、エッチングによって周囲のエリアを導波路１１４の上面まで除去する。ステップ４１６において、マスキングによって導波路１１４の輪郭を規定し、エッチングによって周囲のエリアを基板１１２の上面まで除去する。

【００３１】

先に注記したように、導波路１１２および導波路１１４間の光転送効率、即ち、結合損失および偏光感度は、２つの導波路およびテーパ１１７の寸法に依存する。導波路の非対称性に関しては、本発明者らは、双方の導波路において、同じ成長速度で堆積されると想定される、同じＩｎＧａＡｓＰ成長材料を用いた。導波路間の対称性の度合いは、２つの導波路を構成する種々のＩｎＧａＡｓＰ層の成長時間によって判定するのであり、材料層の組成における相違によるのではない。更に、ＩｎＧａＡｓＰの成長速度にドリフトが少しでもあると、双方の導波路に影響を及ぼす。このドリフトは±１０％になる場合がある。

【００３２】

図５は、本発明による検出器の応答性（単位はアンペア／ワット）を、当該検

出器を構成するＩｎＧａＡｓＰ層の成長速度の関数として示すグラフである。成長速度のばらつきは、この検出器構造において高い応答性をもたらす特定の層設計に対して正規化してある。図示のように、ＩｎＧａＡｓＰ層の成長速度が約０．９ないし１．１の間、即ち、±１０％のばらつきがある場合、検出器の応答性はこのばらつきの影響を殆ど受けず、約０．８Ａ／Ｗである。このように、この検出器の性能（応答性）は、構造のＩｎＰおよび／またはＩｎＧａＡｓＰ層の堆積中に発生し得る成長速度のばらつきに対し耐性がある。

【００３３】

側面テーパ１１７の設計に関して、本発明者らは、導波路１１４および導波路１１６間の結合損失を極力抑え、これによって検出器の応答性を高めるように、設計パラメータを選択した。また、側面テーパ１１７は、製造欠陥に起因するばらつきには殆ど依存しない性能が得られるように設計した。

【００３４】

図６は、本発明の一態様による検出器の応答性を、側面テーパの幅の関数として示すグラフである。図６に示すように、テーパ端（W_{TAPEND}）において１．０μｍの幅を有し、テーパ長（L_{TAP}）が４００μｍに等しいテーパでは、テーパの最も幅が広い地点（W_{TAP}）における幅が約１．８ないし２．２μｍの間にあるときに、検出器１１８から最も高い応答性が得られる。

【００３５】

図５および図６から、前述の測定値を有する光検出デバイスは応答性が非常に高いことが認められる。実際、前述の特性を有する光検出デバイスは、少なくとも４０ＧＨｚまでの速度で使用するのに適している。本発明者らは、経験的に、光検出デバイスの実施形態の一例では、偏光感度が０．５ｄＢ未満であると結論付けた。更に、光検出器は、非常に高い速度で動作可能であることに加えて、製造欠陥に起因するばらつきに対して耐性があるため、商用光通信機器における使用に特に高い適性を備えている。

【００３６】

本発明の別の態様によれば、２つよりも多い垂直結合非同期導波路から成るＰＩＣデバイスを提供する。２つよりも多い垂直結合非対称導波路を有するＰＩＣ

デバイスは、単一のウエハにおいて多種多様のデバイスを一体化可能とする。例えば、１つの導波路を用いて別のデバイスと結合し、第２の導波路を用いて信号を増幅し、更に別の導波路を用いて増幅した信号を別のデバイスに伝達することができる。２つを超えて非対称導波路の数を増加させると、単一のウエハにおいて考案できるデバイスの数および種類が大幅に増える。

【００３７】

図７は、２つよりも多い垂直結合非対称導波路から成るＰＩＣデバイスの一例を示す斜視図である。図示のように、ＰＩＣ７００は、第１導波路７１２、第２導波路７１４、および第３導波路７１６から成る。導波路７１２、７１４、および７１６を構成する材料、およびこれらの材料の相対的な厚さを選択する際、各々異なる有効屈折率を有する異なるモードの光が、これらの導波路の１つにおいて主に伝搬するように行う。導波路に側面テーパを形成し、導波路間の光の移動を制御する。例えば、導波路７１４には側面テーパ７１８を形成し、導波路７１２および導波路７１４間で光を結合する。同様に、導波路７１６には側面テーパ７２０を形成し、導波路７１６および導波路７１４間で光を移動させる。

【００３８】

導波路７１２、７１４、および７１６を用いると、単一基板上に能動および受動デバイスを設けることができる。例えば、これらの導波路を用いて、例えば、半導体光増幅器やレーザのような、能動デバイスを設けることができる。また、これらの導波路を用いて、例えば、検出器、カプラ、スプリッタ、マッハ・ゼンダー干渉計、格子部、およびアレイ状導波路（ＡＷＧ:arrayed waveguide）ルータのような受動デバイスを設けることもできる。勿論、導波路７１２、７１４、および７１６は、一方のデバイスから別のデバイスに単に光を伝達するために用いることもできる。

【００３９】

このように、本発明の一態様によれば、２つよりも多い垂直集積導波路を備え、特定のモードの光が導波路の各々において主に伝搬するように設計した。導波路に側面テーパを形成し、導波路間における光のモードの転送を制御する。更に、導波路周囲に能動および受動デバイスを設計することもできる。したがって、

単一のチップ上で能動および受動デバイスを多様に組み合わせ、様々な種類の複雑なＰＩＣデバイスを形成することが可能となる。

【００４０】

増幅／光検出ＰＩＣは、２つよりも多い垂直結合非対称導波路を備えたＰＩＣデバイスの実施形態の一例を表す。増幅／光検出ＰＩＣでは、光は第１導波路に入射し、光増幅器を構成する第２導波路に結合される。増幅器は、半導体光増幅器（ＳＯＡ）または進行波増幅器（ＴＷＡ）とすることができる。第２導波路の長さにわたって増幅した後、光を第３導波路に結合し、第３導波路に消散的に結合されている光検出器によって最終的に吸収する。

【００４１】

図８は、本発明による光増幅器を有する非対称光検出ＰＩＣの一例を示す斜視図である。図示のように、モノリシックに集積した光検出ＰＩＣ８１０は、基板８１２上に位置し、結合導波路８１４、増幅導波路８１６、第３導波路８１８、および検出器８２０から成る。導波路８１４は、幅が約５μｍであり、レンズ化または劈開した単一モード光ファイバからの結合損失を低く、例えば、２ｄＢ未満に抑えるように設計されている。導波路８１４の遠視野像角度は、垂直および水平両方向において約１３度ないし１８度の間である。導波路８１４は、第１モードの光が主に導波路８１４内を伝搬するように設計されている。実施形態の一例では、第１モードの光の有効屈折率は約３．２である。

【００４２】

増幅導波路８１６は、導波路８１４上に位置し、これと一体的に形成されている。導波路８１６には光増幅器が形成されており、この光増幅器は、例えば、多数の量子井戸（ＭＱＷ）または大規模な能動領域を含むことができる。導波路８１６は、第２モードの光が主に導波路８１６を伝搬するように設計されている。非対称導波路設計によれば、第２導波路８１６内を伝搬する第２モードの光は、約３．３２の有効屈折率を有し、これは導波路８１４内を伝搬する第１モードの光に伴う有効屈折率よりも大きい。導波路８１６は、導波路８１４から導波路８１６への光の結合を改善するために側面テーパ・エリア８１７を有している。実施形態の一例では、導波路８１６および導波路８１４間の結合損失は１ｄｂ未満

である。

【００４３】

導波路８１８は、導波路８１６上に位置し、これと一体的に形成されている。導波路８１８は、第３モードの光が主にこの導波路内を伝搬するように設計されている。非対称導波路設計によれば、導波路８１８内を伝搬する第３モードの光は、約３．３７の有効屈折率を有し、これは導波路８１６内を伝搬する第２モードの光に伴う有効屈折率よりも大きい。また、導波路８１８も側面テーパ・エリア８１９を有し、導波路８１６から導波路８１８への光の結合を改善している。実施形態の一例では、導波路８１８および導波路８１６間の結合損失は１ｄｂ未満である。尚、実施形態の一例では、テーパ部８１９および８１７は重複していないが、他の実施形態では、テーパ８１７および８１９は、用途によっては部分的または完全な重複も可能であることを注記しておく。

【００４４】

検出器８２０は、導波路８１８上に位置し、これと一体的に形成されている。実施形態の一例では、検出器８２０の長さは約２０ないし５０μｍの間であり、ｐ＋クラッディング層８３０、ｎ＋整合層８３２、およびＩｎＧａＡｓ吸収層８３４から成るＰＩＮ型検出器である。導波路８１８および検出器８２０間の吸収係数は、光検出器８２０の３０μｍの範囲では８０％よりも大きい。尚、実施形態の一例では、検出器８２０は導波路８１８とは別個の構成要素であるが、別の実施形態では、検出器８２０を導波路８１８内に一体化してもよいことを注記しておく。

【００４５】

導波路８１８は、テーパ・エリア８１９の前方に広がる拡張エリア８４０を含む。導波路８４２の上面には、導波路８１６内に含まれる増幅器を活性化する第１コンタクト・エリアがある。実施形態の一例では、このコンタクトはｐ＋コンタクトである。導波路８１６の増幅器を活性化する第２コンタクトは、導波路８１４の上面８４４である。実施形態の一例では、第２コンタクトはｎ＋コンタクトである。これらのコンタクト間に電圧を印加すると、導波路８１６内に含まれる増幅器が活性化し、その中を伝搬する光を増幅する。

【００４６】

光は、導波路８１４を通って光検出ＰＩＣ８１０に入射する。導波路８１４は、例えば、光ファイバのような別のデバイスに結合することができる。少なくとも第１モードの光が導波路８１４を伝搬し、導波路８１６のテーパ部８１７に到達すると、導波路８１６内を伝搬し始める。第１モードの有効屈折率は、テーパ領域８１７の長さにわたって増大する。その結果、テーパ領域８１７の幅広端に到達すると、テーパ内を伝搬した光は第２モードの光に遷移し、主に導波路８１６内に制限される。導波路８１６内を伝搬している間に、光は、内部の光増幅器の結果として、利得を得る。主に導波路８１６内を伝搬する第２モードの光は、導波路８１８のテーパ部８１９に到達すると、導波路８１８内を伝搬し始める。第２モードの有効屈折率は、テーパ領域８１９の長さにわたって増大する。その結果、テーパ領域８１９の幅広端に到達すると、テーパ内を伝搬した光は第３モードの光に遷移し、主に導波路８１８に制限される。導波路８１８は、消散的に検出器８２０に結合されている。十分な量の消散場(evanescent field)が、検出器８２０の、例えば、２０ないし１００μｍという短い距離で吸収され、導波路８１８内における光の存在を効果的に特定することができる。

【００４７】

図９は、本発明の一態様による光増幅器を有する非対称光検出ＰＩＣの一例を示す断面図である。図示のように、ＰＩＣ８１０は、半絶縁基板８１２上に成長し、実施形態の一例では、半絶縁基板８１２はＩｎＰで構成されている。結合導波路８１４は、厚さが約３μｍのＩｎＧａＡｓＰ層９１０を備えている。別の実施形態では、結合導波路８１４は、屈折率がもっと高いいくつかのＩｎＧａＡｓＰ層から成り、ＩｎＰ層と共に散在させることによって、単一モード希薄導波路(diluted waveguide)を形成することも可能である。図９を参照すると、導波路８１６は、２つの制限ヘテロ構造層９１４の間に位置する３つのＩｎＧａＡｓＰ量子井戸９１２を備えており、各制限ヘテロ構造層の厚さは約０．１５μｍである。量子井戸には引張歪みおよび圧縮歪みを加え、偏光には感応しない光増幅器を形成する。導波路８１８は、厚さが約０．６μｍのＩｎＧａＡｓＰ層９１４から成る。検出器８１８は、ｎ－ドープ層９１６、ＩｎＧａＡｓ吸収層９１８、お

よびｐ－ドープＩｎＰ層９２０から成る。別の実施形態では、ＰＩＮ構造におけるドーピング層の極性を逆にして、ｐ＋下位層、非ドープＩｎＧａＡｓ層、および上位ｎ＋層を形成してもよい。

【００４８】

非対称光検出ＰＩＣ８１０を製造するには、一連のマスキングおよびエッチング工程を経る。図１０は、本発明の一態様にしたがって光検出ＰＩＮを製造するプロセスを示すフローチャートである。図示のように、ステップ１０１０において、図９を参照しながら先に説明したような層から成るモノリシック構造を、例えば、ＩｎＰ構造１１２上に単一のエピタキシャル工程でＭＢＥまたはＭＯＣＶＤによって成長させる。ステップ１０１２において、マスキングによって検出器８２０の輪郭を規定し、エッチングによって周囲の層を導波路８１８の上面まで除去する。ステップ１０１４において、側面テーパ８１９が形成されている導波路をマスキングによって規定し、エッチングによって周囲のエリアを導波路８１６の上面まで除去する。ステップ１０１６において、マスキングによって導波路８１６の輪郭を規定し、エッチングによって周囲のエリアを導波路８１４の上面まで除去する。ステップ１０１８において、マスキングによって導波路８１４の輪郭を規定し、エッチングによって周囲のエリアを基板１１２の上面まで除去する。ステップ１０２０において、検出器８２０および増幅導波路８１６上にコンタクトを形成する。

【００４９】

本発明者は、経験的に、前述のような増幅／光検出ＰＩＣ８１０は動作可能であると結論付けた。図１１は、結合導波路８１４に注入した光について、増幅／光検出デバイス８１０の長さに沿った光パワーを示すグラフである。図１１の左側には、増幅光検出器８１０の上面図も示している。結合導波路８１４、側面テーパ８１７および８１９、ならびに検出器８２０を図示している。光パワーがデバイス８１０を伝搬すると、種々の構成要素が種々のレベルのパワーを得る。

【００５０】

図１１の右側に示す対応のグラフは、検出ＰＩＣ８１０の異なる区間で得られるパワーを時間の関数として示す。線１１１０は、結合導波路８１４に生ずるパ

ワーを示す。線１１１２は、増幅導波路８１６に生ずるパワーを示す。線１１１４は、導波路１１１６に生ずるパワーを示す。線１１１６はシステムにおける全パワーを表す。

【００５１】

デバイス８１０に入射した光パワーは、最初に結合導波路８１４に達する。したがって、導波路８１４内のパワーを表す線１１１０は、最初に非ゼロの値を有する。光信号がデバイス８１０内を伝搬していくと、導波路８１６のテーパ８１７に到達し、ここでパワーは導波路８１６に結合する。したがって、導波路８１６内のパワーを表す線１１１２は、テーパ８１７の位置で上昇し始める。線１１１２は、導波路８１６の長さ全域で上昇し続け、導波路８１６の増幅特性を示す。次に、デバイス８１０内を伝搬する光信号はテーパ８１９に達し、ここでパワーは導波路８１８に結合する。したがって、導波路８１８内のパワーを示す線１１１６は、テーパ８１９の位置で上昇し始める。最後に、デバイス８１０の全行程を伝搬し終えた光パワーは、検出器８２０に吸収される。したがって、検出器８２０の先端に対応する位置では、線１１１０、１１１２、１１１４および１１１６で示した、デバイスの全部分におけるパワーは急速に低下する(fall off)。

【００５２】

このように、本発明の一態様による非対称増幅／光検出器は、光検出器による吸収の前に光パワーを増幅するように動作可能である。検出前に光信号を増幅すると、受信器の応答性が向上する。ビット・レートが高い信号では、電気増幅器の熱ノイズが検出器の感度を左右するので、これは特に重要である。

【００５３】

増幅自発放出（ＡＳＥ：amplified spontaneous emission）が受信器の応答性と干渉する可能性があることが知られている。したがって、ＡＳＥを低減するには、フィルタを光検出デバイス内に組み込むことが望ましいであろう。図１２は、ＡＳＥフィルタを組み込んだ、本発明による検出デバイスの上面図を示す。図示のように、デバイス１２１０は、結合導波路１２１２、内部に光増幅器を有する第２導波路１２１４、検出器１２１８が結合されている第３導波路１２１６を備えている。デバイス１２１０は、更に、第２導波路１２１４と第３導波路１２

１６との間に位置する格子フィルタ１２２０も備えている。"Grating-Assisted InGaAsP/InP Vertical Codirectional Coupler Filter"（格子補助ＩｎＧａＡｓＰ／ＩｎＰ垂直同一方向カプラ・フィルタ）(55 Applied Physics Letters, 2011-13（１９８９年１１月）)と題するAlferness et al.による論文に詳しく記載されているように、格子フィルタは、ＡＳＥおよび当該ＡＳＥが誘発し受信器の応答性と干渉する虞れがあるショット・ノイズを排除するように動作する。導波路１２１４から射出する光は、導波路１２１６に入射する前に、格子フィルタ１２２０によって濾過される。図１２の実施形態の一例では、格子フィルタ１２２０は平行カプラ格子であり、格子フィルタは２つの平行な導波路の間で動作する。別の実施形態では、格子フィルタ１２２０は、平行カプラのない、直線格子(straight-on grating)とすることも可能である。尚、格子フィルタ１２２０を調整可能とし、波長の選択的濾過に対応するようにしてもよいことを注記しておく。このような実施形態では、格子フィルタ１２２０を変調、即ち、調整して、導波路１２１６に結合されている検出部に、特定の波長の光を入射させるようにすることも可能である。

【００５４】

図１３は、本発明による増幅器／光検出器によって得られるような、増幅によってもたらされる受信器の応答性の向上を示す。図１３は、１０^{-9}のビット・エラー・レートを得るために光検出器において検出可能な最少入力パワーの計算値（単位はｄＢｍ）を、増幅器即ちＳＯＡの利得の関数として示すグラフである。点線１３１０は、１０^{-9}のビット・エラー・レートを達成するために、増幅器を有していない４０ＧＢｐｓ検出器において検出可能な最少入力パワーを表す。同様に、点線１３１２は、増幅器を有していない１０ＧＢｐｓにおいて検出可能な、１０^{-9}のビット・エラー・レートを得るための最少パワーを表す。線１３１０および１３１２は増幅素子のない光検出器を表すので、線は水平である。

【００５５】

比較のため、線１３１４は、４０ギガビット増幅／検出器において検出可能な、１０^{-9}のビット・エラー・レートを得るための最少入力パワーを表し、増幅が増大すると急速に低下する。点線１３１６は、フィルタを有する４０ギガビット

増幅／検出器において検出可能な最少入力パワーを表す。線１３１８は、１０ギガビット増幅／検出器において検出可能な、１０$^{-9}$のビット・エラー・レートを得るための最少入力パワーを表す。点線１３２０は、フィルタを有する１０ギガビット増幅／検出器において検出可能な入力パワーを表す。

【００５６】

線１３１４および１３１８で示すように、１０$^{-9}$のビット・エラー・レートを達成するために検出可能な最少入力パワーは、増幅／光検出器における増幅利得が増大するに連れて減少する。利得が増大して約１５ｄＢを超過すると、所望のビット・エラー・レートを達成するために必要な入力パワーは一定となる。増幅器のない４０ＧＢｐｓ検出器に対応する線１３１０を、増幅器がある４０ＧＢｐｓ検出器に対応する線１３１４と比較すると、検出器の利得が約１５ｄＢを超えたところでは、所望のビット・エラー・レートを得るために検出器において受信可能な入力パワーの量は、約１０ｄＢだけ減少することがわかる。このように、予備増幅の使用によって、検出器の応答性にかなりの向上が得られる。更に、線１３１６および１３１８で示すように、ＡＳＥを低減するためにフィルタを追加すると、増幅器の利得が約１５ｄＢより大きいところでは、増幅／検出器の応答性は一層高まる。しかしながら、例えば、線１３１４および１３１６で表した４０ギガビット検出器のように、ボー・レートが更に高い検出器では、例えば、線１３１８および１３２０で表した１０ギガビット検出器のような、低いボー・レートの受信器程大きな応答性の改善は、フィルタによって得られないことを注記しておく。

【００５７】

以上のように、改良したモノリシック集積光検出デバイス、および改良したＰＩＣデバイスの設計を開示した。本発明の一態様によれば、非対称導波路に基づく光検出ＰＩＣを提供する。改良した光検出ＰＩＣの実施形態の一例は、応答性が非常に高く、少なくとも４０ＧＨｚ程度の周波数で使用するように動作可能である。

【００５８】

更に、側面テーパを有する垂直非対称導波路を２つよりも多く、単一のＰＩＣ

デバイスに組み込むための設計も開示した。例えば、本発明の一態様によれば、増幅／光検出器ＰＩＣを開示した。このＰＩＣは、検出の前に信号を増幅することによって、既存の非対称検出器の設計を改良した。信号の増幅によって、電子検出回路におけるノイズの混入による精度低下を抑制し、検出精度が向上する。

【００５９】

前述の増幅／光検出器ＰＩＣは、多数の非対称導波路および多数のデバイス種別、即ち、受動導波路、増幅器および検出器を単一のＰＩＣに一体化する一例である。多重非対称導波路設計は、他の種類のデバイスを形成するために応用することができる。本発明を組み込んだデバイスでは、受動導波路をファイバに対する効率的な結合のために用い、例えば、カプラ、スプリッタ、マッハ・ゼンダー干渉計およびアレイ状導波路（ＡＷＧ）ルータのような種々の受動デバイスを形成するために用いることもできる。同じデバイスにおいて、光学的な予備増幅を行うため、または他の受動構成部品を含むＰＩＣとの通信に伴う損失を補償するためにも光増幅器を用いることができる。最後に、これら同じデバイスは、検出器を組み込み、恐らくは検出器アレイとして動作することができ、各々が４０ＧＨｚまでおよび４０ＧＨｚを超えても高速低ノイズ、高ダイナミック・レンジ動作を可能とする。このように、本発明者らは、これまで実現されなかった種類の複雑なＰＩＣを提供するために用いることができる、多重非対称導波路設計を発案した。

【００６０】

以上具体的な実施形態を参照しながら本発明について説明しかつ図示したが、先に説明し特許請求の範囲に明記してある、本発明の原理から逸脱することなく変更や変形も可能であることを当業者は認めよう。例えば、本発明による集積光検出器は、前述とは異なる測定値を有するテーパを備えてもよい。また、導波路は、例えば、ＧａＡｓ、ＧａＳｂおよびＧａＮのように、前述とは異なる材料で構成してもよく、更に前述以外の厚さを有してもよい。更に、本発明を多種多様のデバイスにおいて用いることも可能である。例えば、本発明による増幅／光検出器は、光通信リンクの高感度４０ＧＨｚ受信器を作成するためにも採用することができる。したがって、添付の特許請求の範囲を参照して本発明の範囲を示す

こととする。

【図面の簡単な説明】

【図１】

図１Ａは、本発明の一態様による光検出ＰＩＣの斜視図である。

図１Ｂは、本発明の一態様による光検出ＰＩＣの第２の斜視図である。

【図２】

図２は、本発明の一態様による光検出ＰＩＣの断面図である。

【図３】

図３は、本発明の一態様による光検出ＰＩＣの上面図である。

【図４】

図４は、本発明の一態様にしたがって光検出ＰＩＣを製造するプロセスのフローチャートである。

【図５】

図５は、本発明による光検出ＰＩＣの応答性を、その複合層の成長速度の関数として示すグラフである。

【図６】

図６は、本発明による光検出ＰＩＣの応答性を、その中に形成された側面テーパの幅の関数として示すグラフである。

【図７】

図７は、本発明による垂直集積導波路を２つよりも多く含むＰＩＣの斜視図である。

【図８】

図８は、本発明の一態様による、光増幅器を有する非対称光検出ＰＩＣの斜視図である。

【図９】

図９は、本発明の一態様による増幅／光検出ＰＩＣの断面図である。

【図１０】

図１０は、本発明の一態様にしたがって増幅／光検出ＰＩＣを製造するプロセスのフローチャートである。

【図１１】

図１１は、本発明による増幅／光検出デバイスの種々の部分における光パワーを、時間の関数として表したグラフである。

【図１２】

図１２は、フィルタを組み込んだ、本発明による増幅／光検出デバイスの上面図である。

【図１３】

図１３は、１０^{-9}のビット・エラー率を達成するように計算した最小入力パワー（ｄＢｍ単位）を、増幅器の利得の関数として示すグラフである。

【図１Ａ】

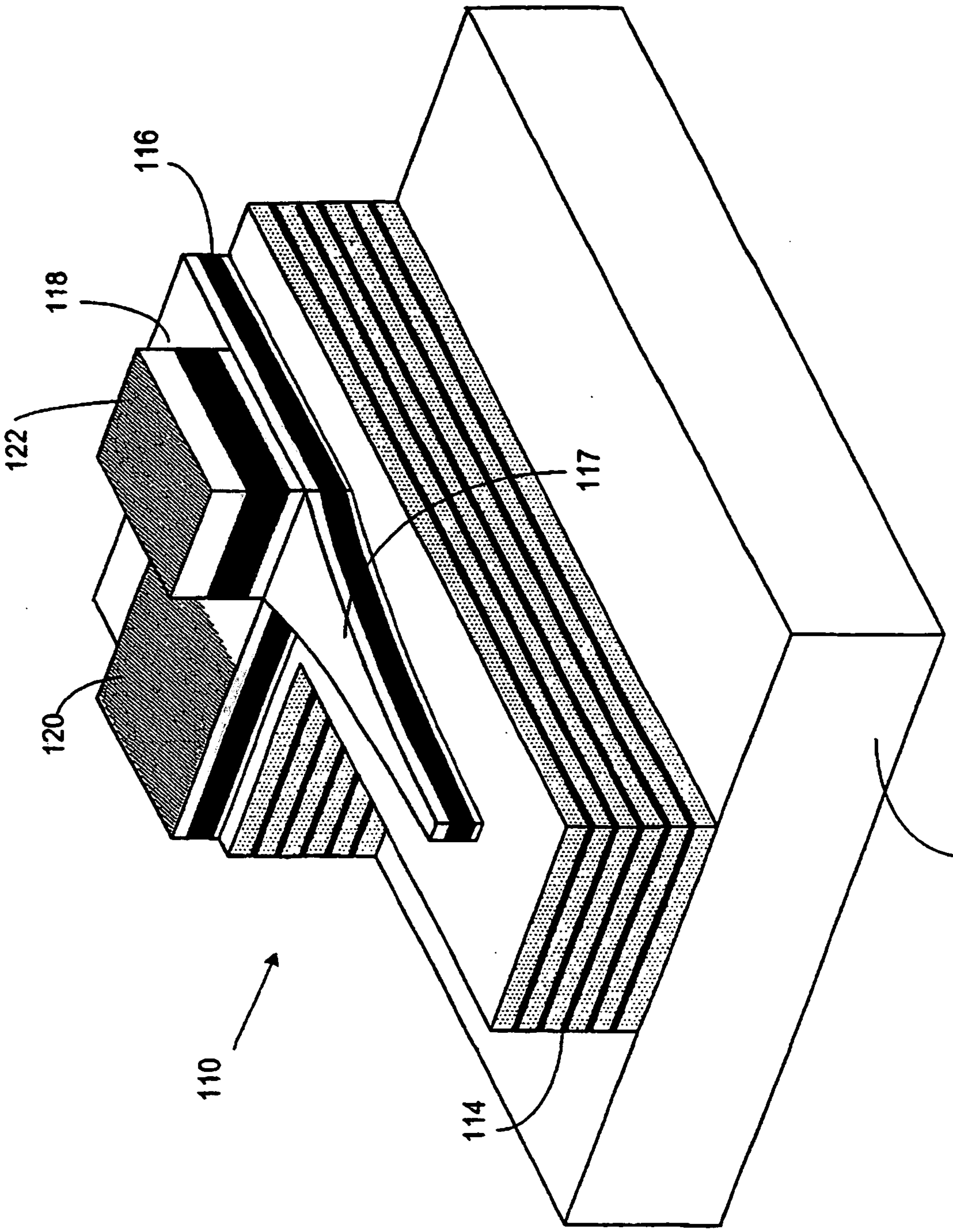


Fig. 1A

【図１Ｂ】

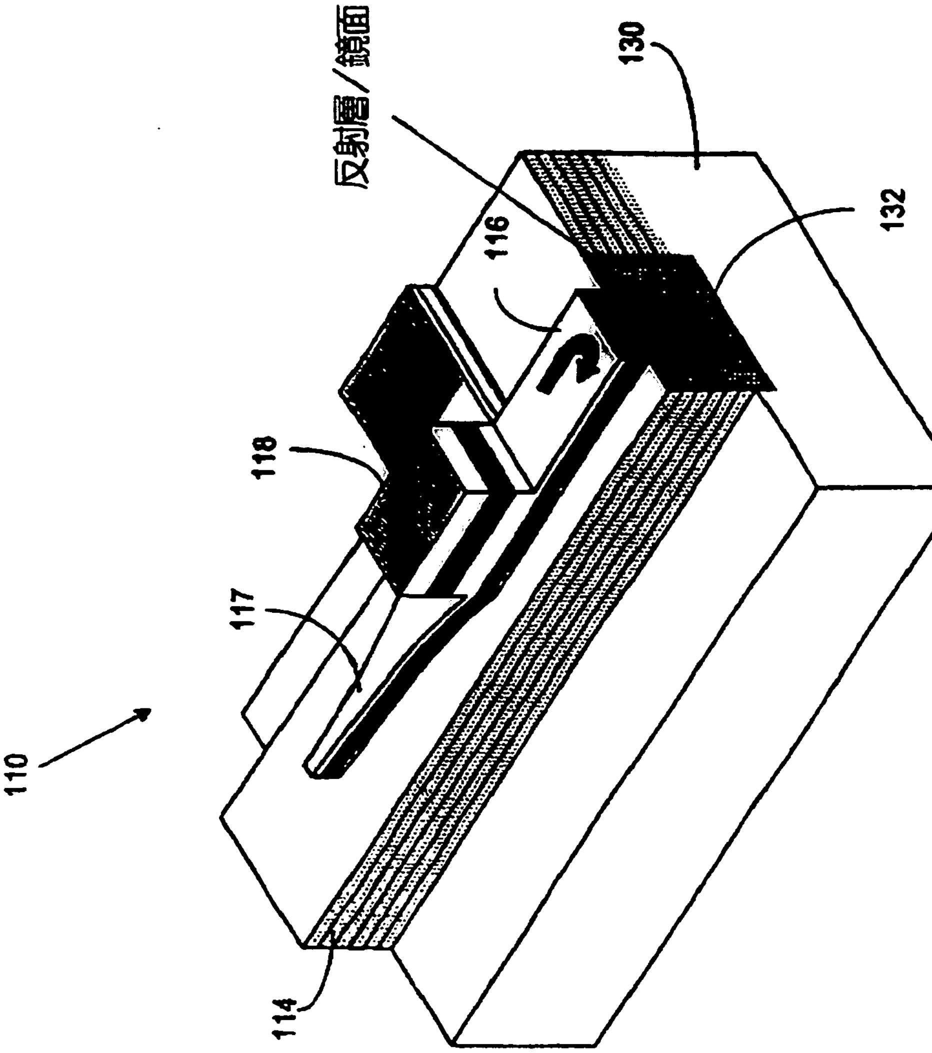
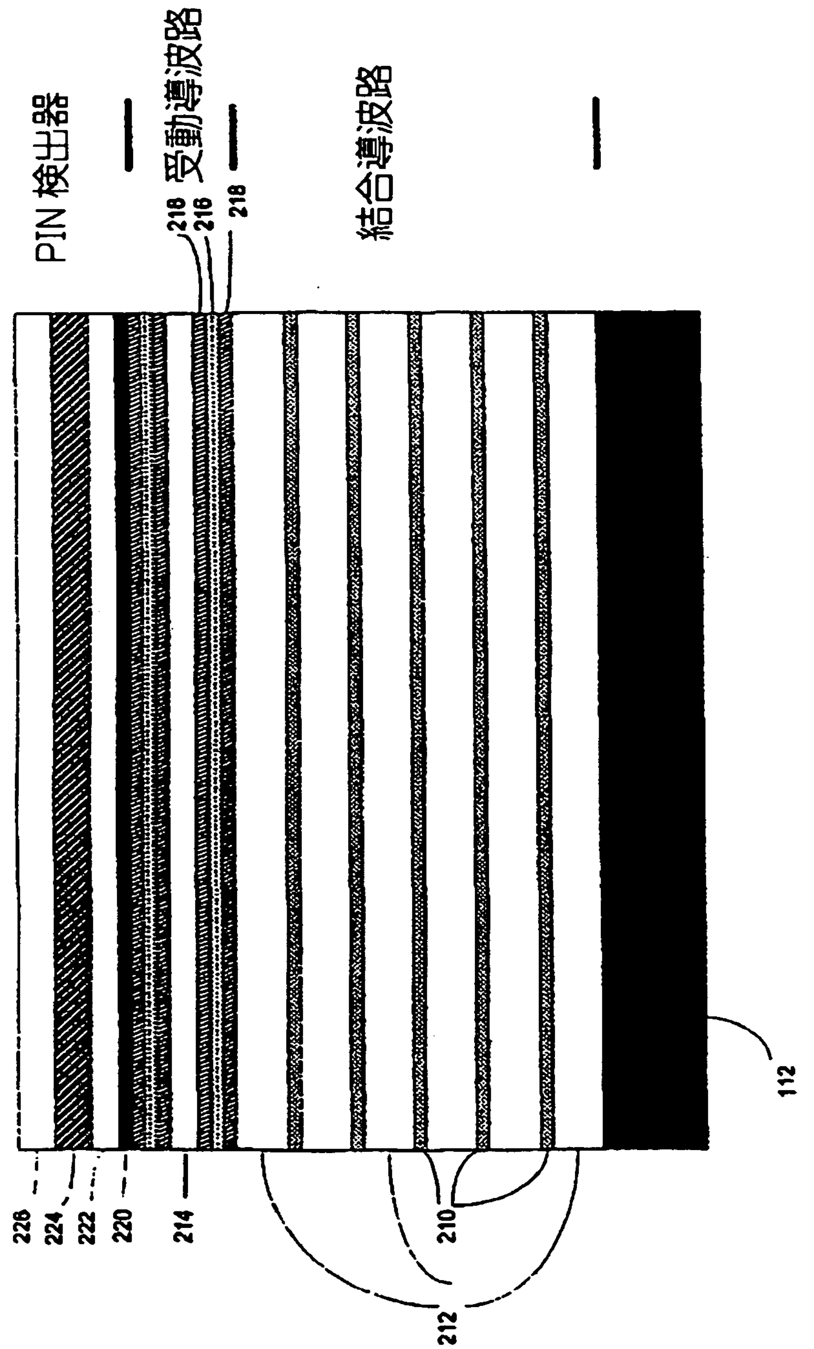
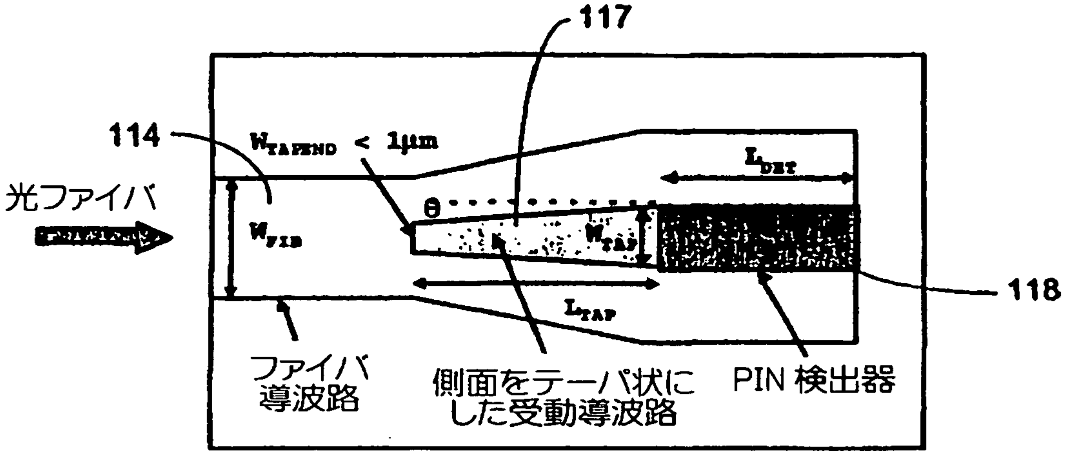


FIG. 1B

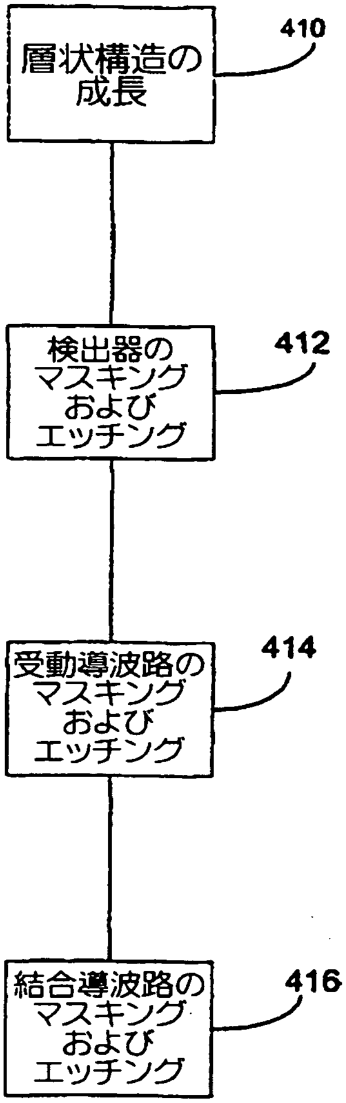
【図２】



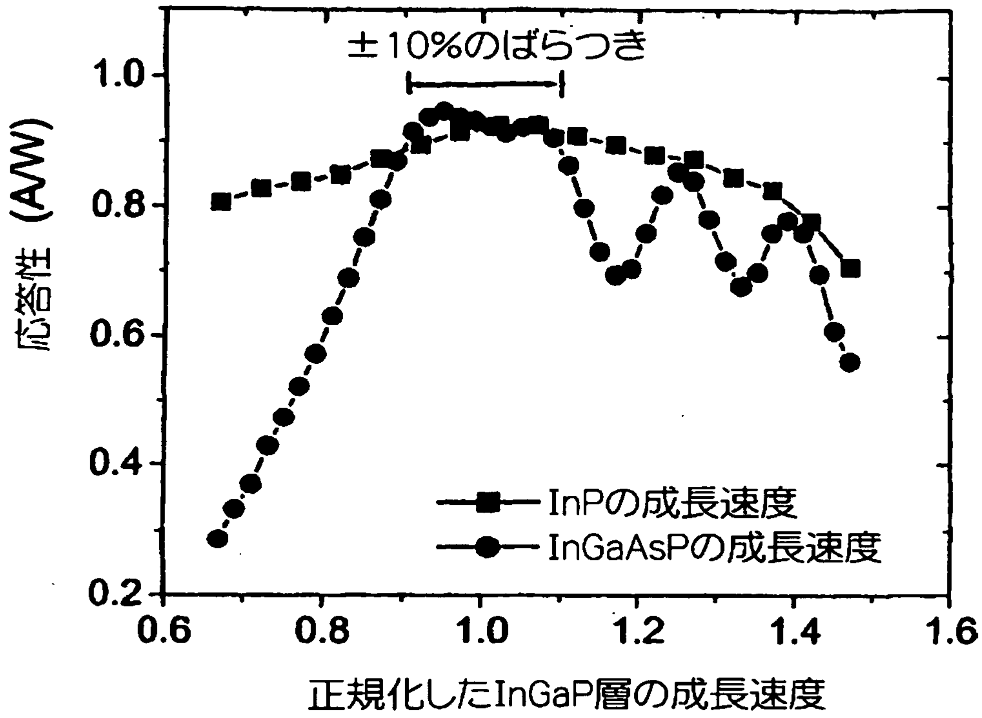
【図３】


117
114
$W_{TAPEND} < 1\mu m$
L_{DET}
光ファイバ
θ
W_{FIB}
W_{TAP}
118
L_{TAP}
ファイバ導波路
側面をテーパ状にした受動導波路
PIN 検出器

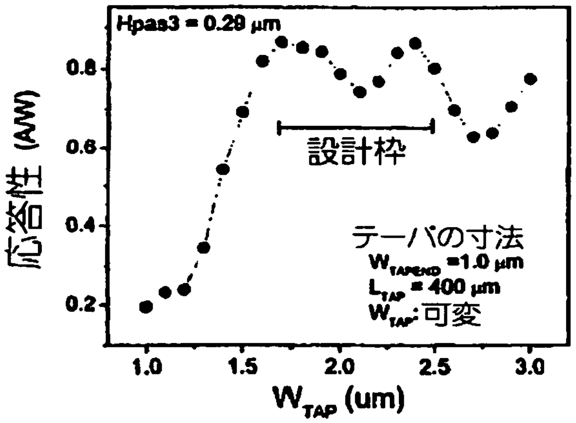
【図４】


層状構造の成長
410
検出器のマスキングおよびエッチング
412
受動導波路のマスキングおよびエッチング
414
結合導波路のマスキングおよびエッチング
416

【図５】


±10%のばらつき
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
応答性 (A/W)
InPの成長速度
InGaAsPの成長速度
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
正規化したInGaP層の成長速度

【図６】


Hpas3 = 0.29 µm
0.8
0.6
0.4
0.2
応答性 (A/W)
設計枠
テーパの寸法
W_TAPEND =1.0 µm
L_TAP = 400 µm
W_TAP: 可変
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
W_TAP (um)

【図７】

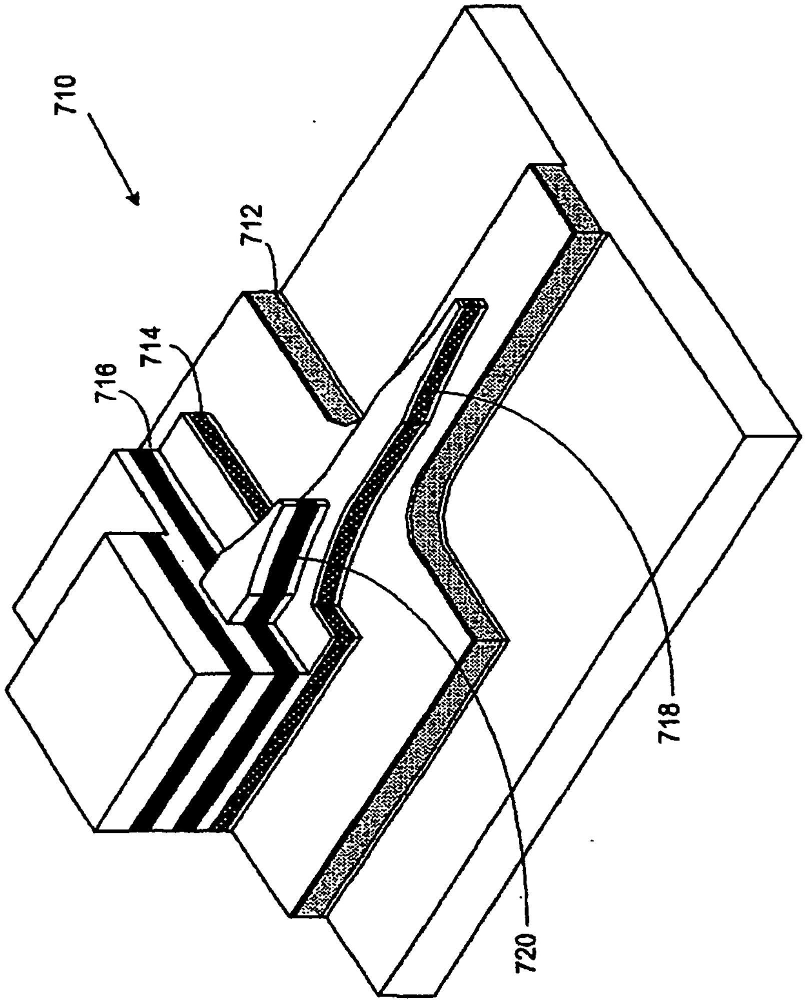


FIG. 7

【図８】

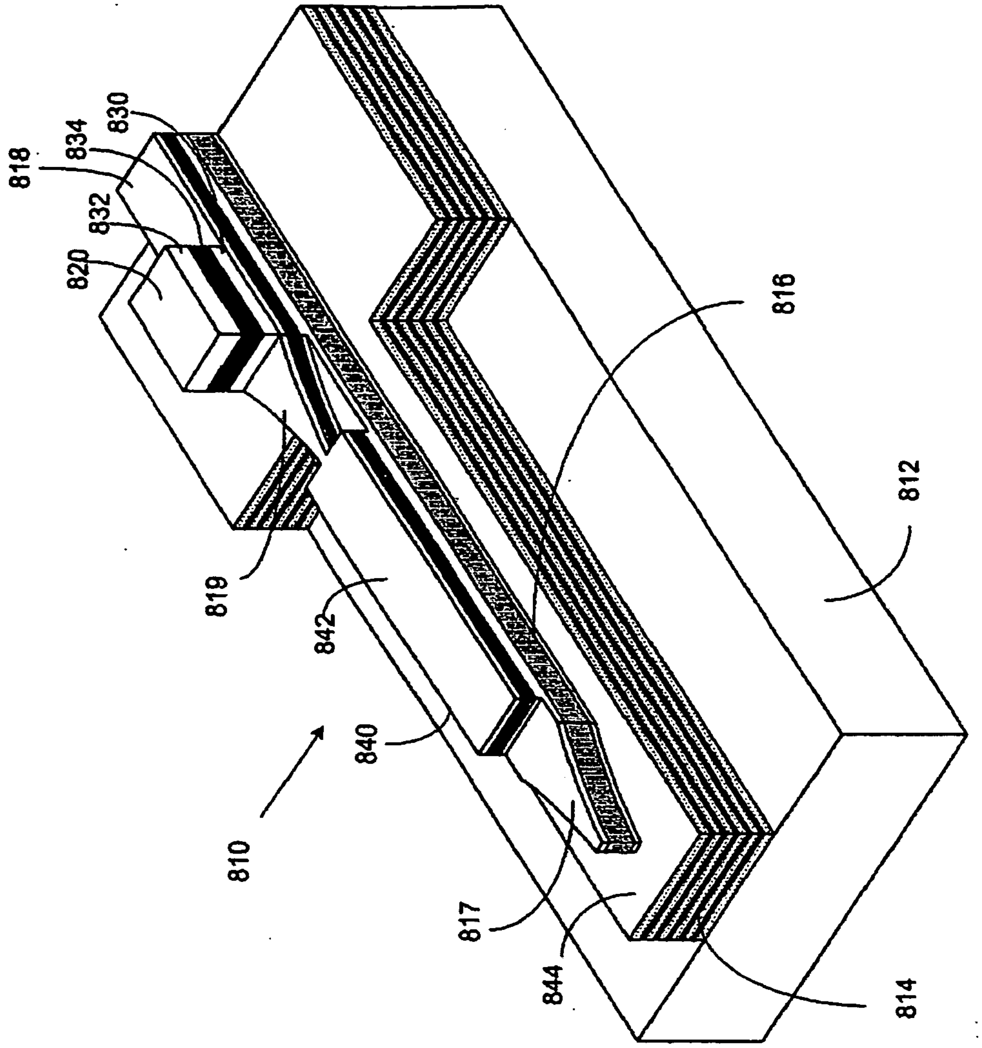
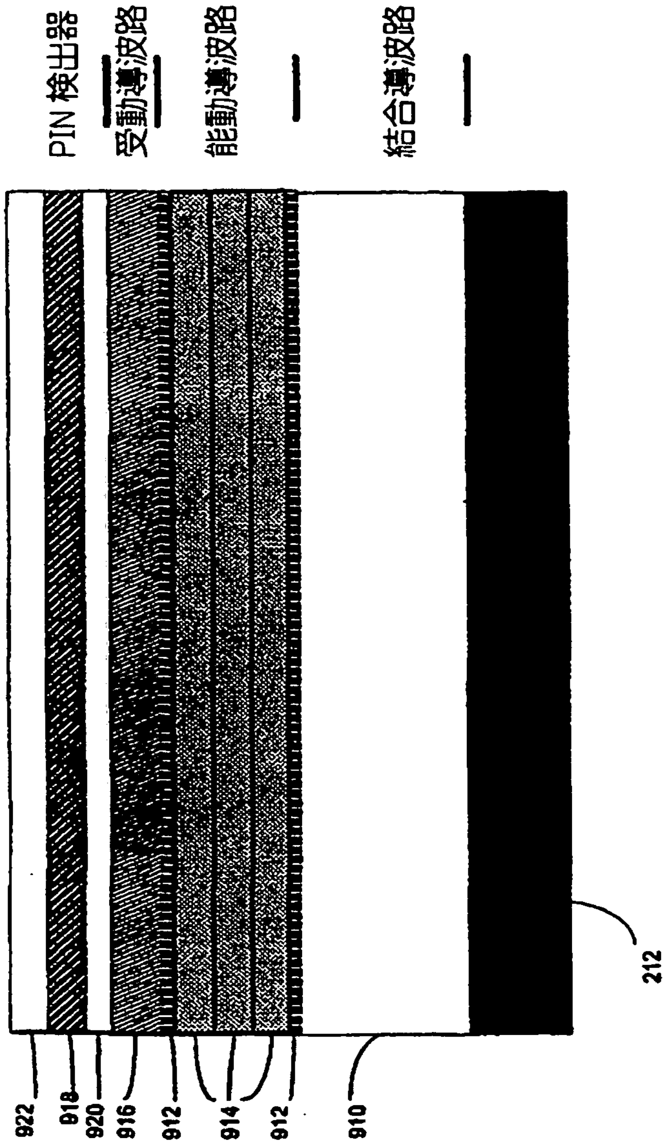
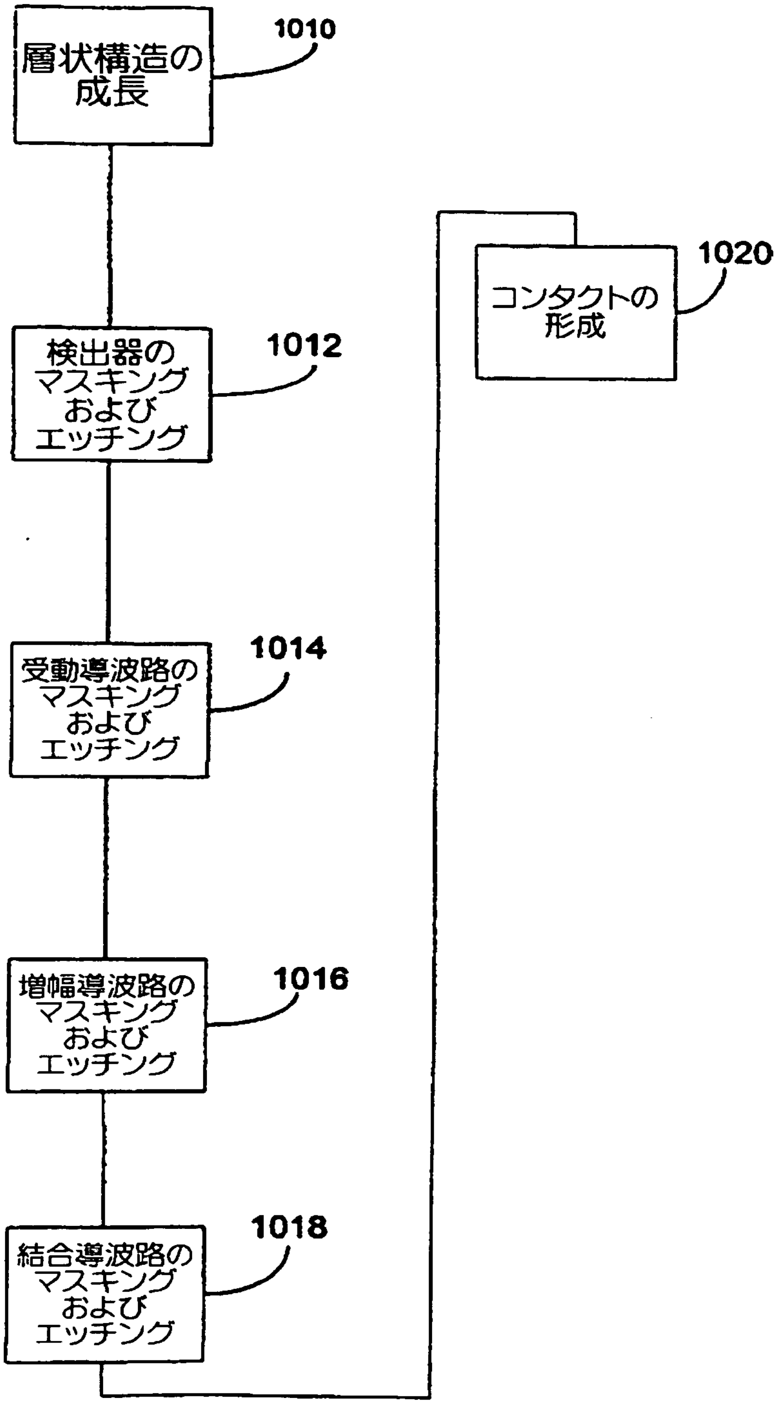


FIG. 8

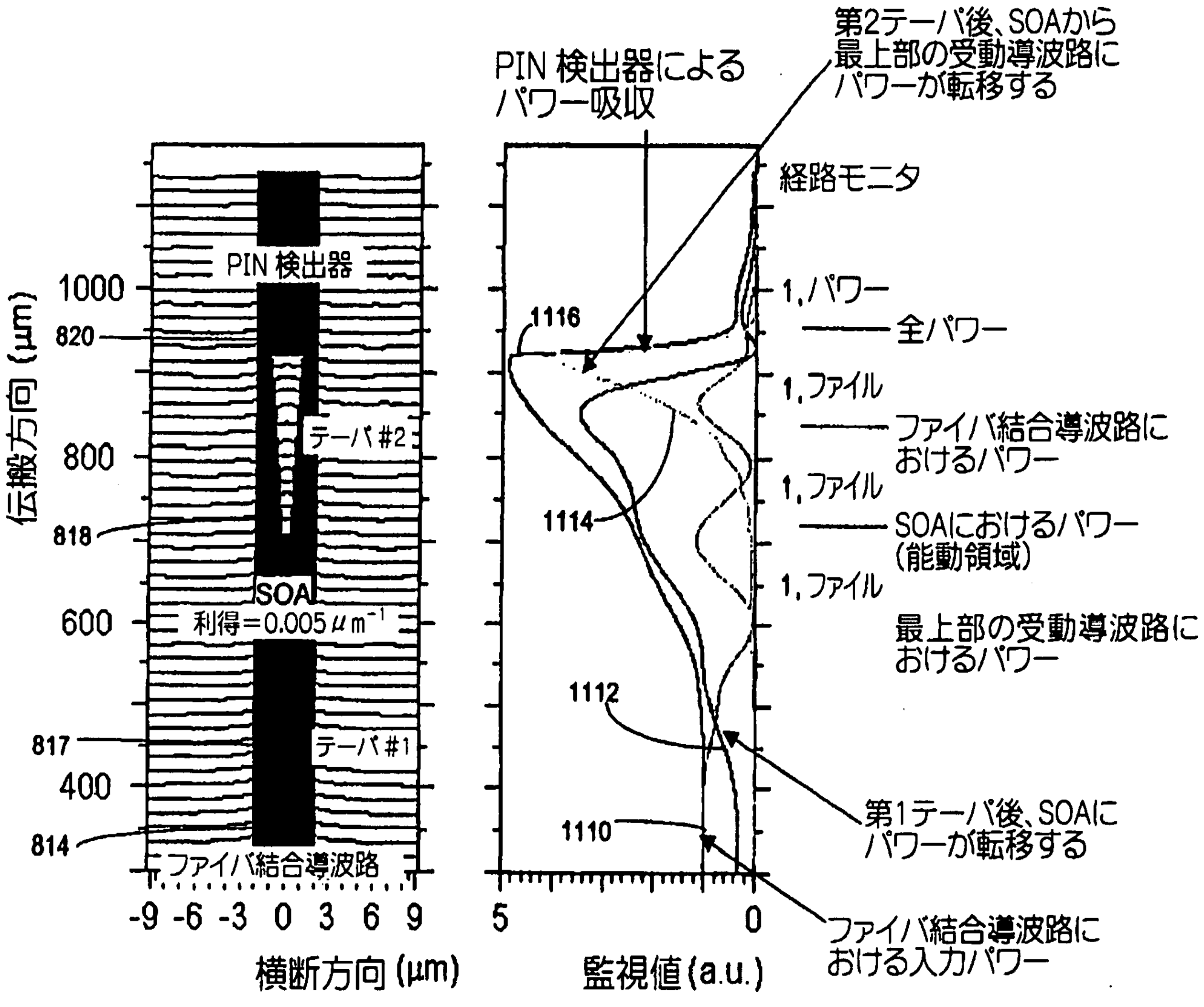
【図９】



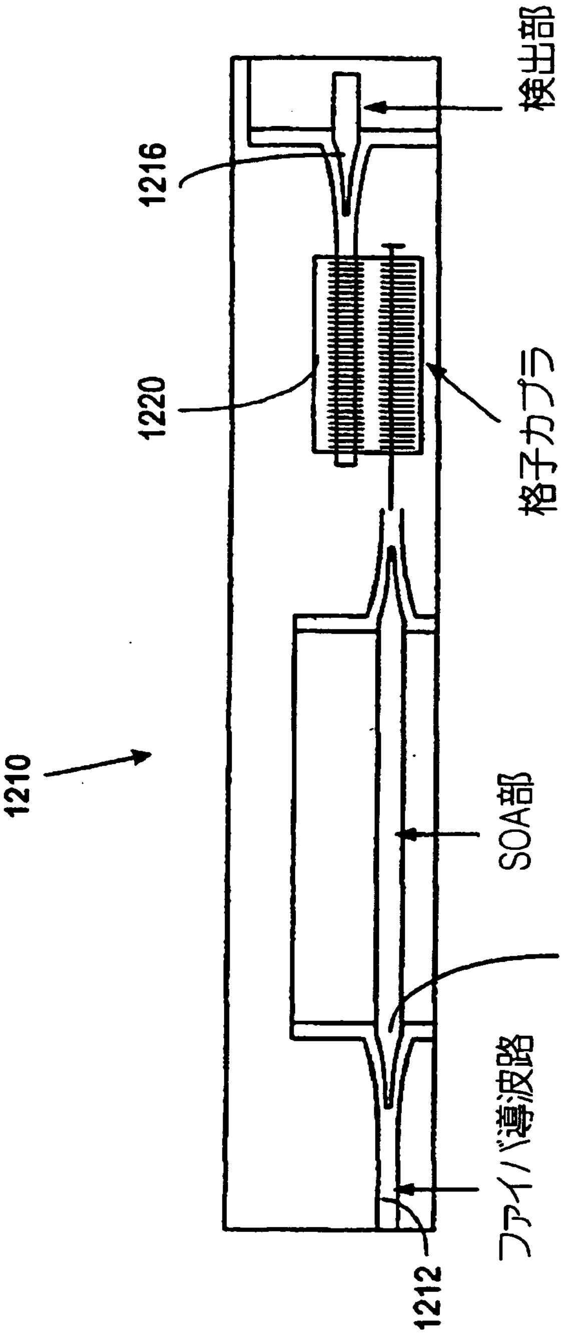
【図１０】


層状構造の成長
1010
検出器のマスキングおよびエッチング
1012
受動導波路のマスキングおよびエッチング
1014
増幅導波路のマスキングおよびエッチング
1016
結合導波路のマスキングおよびエッチング
1018
コンタクトの形成
1020

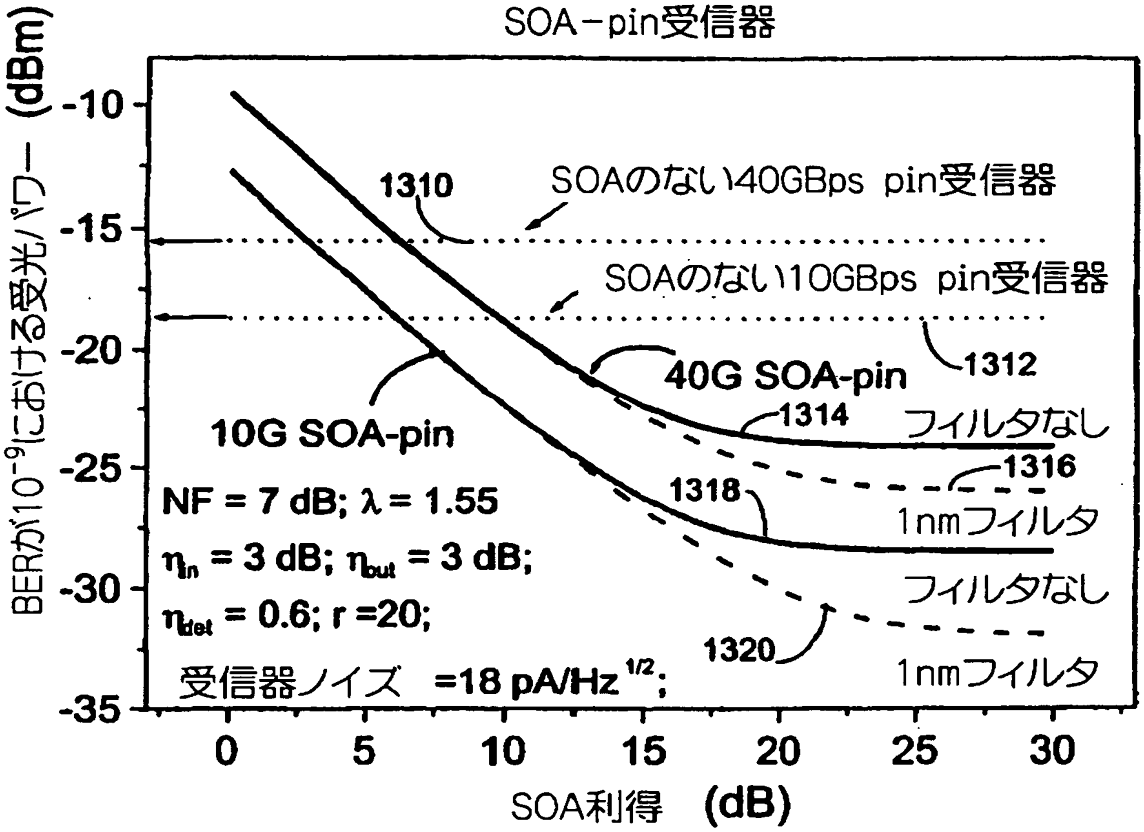
【図１１】


PIN 検出器によるパワー吸収
第2テーパ後、SOAから最上部の受動導波路にパワーが転移する
経路モニタ
1, パワー
全パワー
1, ファイル
ファイバ結合導波路におけるパワー
1, ファイル
SOAにおけるパワー（能動領域）
1, ファイル
最上部の受動導波路におけるパワー
第1テーパ後、SOAにパワーが転移する
ファイバ結合導波路における入力パワー
1116
1114
1112
1110
5
0
監視値 (a.u.)
PIN 検出器
テーパ #2
SOA
利得＝0.005 μm^{-1}
テーパ #1
ファイバ結合導波路
1000
820
800
818
600
817
400
814
伝搬方向 (μm)
-9 -6 -3 0 3 6 9
横断方向 (μm)

【図１２】



【図１３】


SOA－pin受信器
BERが10^{-9}における受光パワー (dBm)
-10
-15
-20
-25
-30
-35
0
5
10
15
20
25
30
SOA利得 (dB)
1310
SOAのない40GBps pin受信器
SOAのない10GBps pin受信器
1312
40G SOA-pin
10G SOA-pin
1314
フィルタなし
1316
1nmフィルタ
1318
フィルタなし
1320
1nmフィルタ
NF = 7 dB; λ = 1.55
η_{in} = 3 dB; η_{out} = 3 dB;
η_{det} = 0.6; r =20;
受信器ノイズ =18 pA/Hz$^{1/2}$;

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US01/14756

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC(7) : G02B 6/10, 6/12, 6/20, H01S 5/32
US CL : 385/14, 28, 29, 30, 37, 42, 43, 50, 131; 372/50
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
U.S. : 385/14, 28, 29, 30, 31, 32, 37, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 131; 372/20, 43-50, 96, 97, 102; 359/344

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
NONE

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
NONE

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A,E	US 6,240,233 B1 (WEINERT et al) 29 May 2001 (29.05.2001), see entire document.	1-40
A	US 5,985,685 A (LEALMAN et al) 16 November 1999 (16.11.1999), see entire document, especially figs. 1 and 5e.	1-40

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier application or patent published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 30 June 2001 (30.06.2001)	Date of mailing of the international search report 31 July 2001
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703) 305-3230	Authorized officer Hemang Sanghavi Telephone No. (703) 308-0956

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1998)

フロントページの続き

(81)指定国　EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AP(GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZW

(72)発明者　ゴクヘイル, ミリンド・アール
アメリカ合衆国ニュージャージー州08540, プリンストン, サウス・ハリソン・ストリート　263, ナンバー2

(72)発明者　ストゥデンコフ, パヴェル・ブイ
アメリカ合衆国ニュージャージー州08852, モンマウス・ジャンクション, シャドウ・オウクス・コート　6208

Fターム(参考)　2H047 KA03 KB04 KB08 MA05 MA07
PA06 QA02
5F088 AA03 BA03 BA15 BB01 EA07
EA11 GA05 GA09 JA14

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau

(43) International Publication Date
22 November 2001 (22.11.2001)

PCT

(10) International Publication Number
WO 01/88577 A1

(51) International Patent Classification⁷: **G02B 6/10**, 6/12, 6/20, H01S 5/32

(21) International Application Number: PCT/US01/14756

(22) International Filing Date: 8 May 2001 (08.05.2001)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:
60/203,846 12 May 2000 (12.05.2000) US
09/717,851 21 November 2000 (21.11.2000) US

(71) Applicant: THE TRUSTEES OF PRINCETON UNIVERSITY [US/US]; 5 New South Building, P.O. Box 36, Princeton, NJ 08544 (US).

(72) Inventors: FORREST, Stephen, R.; 148 Hunt Drive, Princeton, NJ 08540 (US). **GOKHALE, Milind, R.**; 263 South Harrison Street #2, Princeton, NJ 08540 (US). **STUDENKOV, Pavel, V.**; 6208 Shadow Oaks Court, Monmouth Junction, NJ 08852 (US).

(74) Agents: CALDWELL, John, W. et al.; Woodcock Washburn Kurtz MacKiewicz & Norris LLP, 46th Floor, One Liberty Place, Philadelphia, PA 19103 (US).

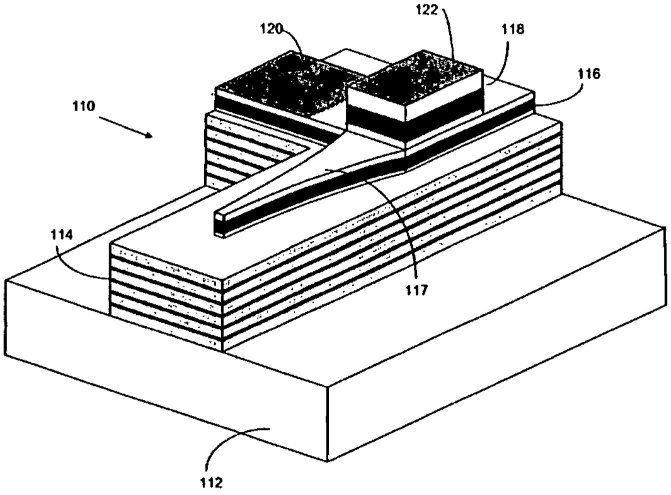
(81) Designated States *(national)*: AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZW.

(84) Designated States *(regional)*: ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Published:
— *with international search report*

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: PHOTONIC INTEGRATED DETECTOR HAVING A PLURALITY OF ASYMMETRIC WAVEGUIDES



(57) Abstract: A photonic integrated circuit "PIC" device comprising two or more vertically stacked asymmetric waveguides is provided. A photo-detector PIC device comprises a first coupling waveguide (114) for providing a low-coupling loss with an external optical fiber and for guiding primarily a first mode of light, a second waveguide (116) vertically coupled to the first waveguide (114) for guiding primarily a second mode of light having an effective index of refraction different from the first mode, and a photo-detector (118) vertically coupled to the second waveguide (116). Light received at the coupling waveguide is moved into the second waveguide via a lateral taper (117) in the second waveguide. The photo-detector PIC may further comprise a third waveguide having an optical amplifier therein and positioned between the coupling waveguide and the second waveguide.

WO 01/88577 A1

PHOTONIC INTEGRATED DETECTOR HAVING A PLURALITY OF ASYMMETRIC WAVEGUIDES

RELATED APPLICATIONS

This application is related by subject matter to U.S. Provisional Patent Application Serial Number 60/203,846, filed May 12, 2000, entitled "Twin Waveguide Based Design for Photonic Integrated Circuits" the contents of which are hereby incorporated by reference in their entirety.

FIELD OF THE INVENTION

The present invention relates generally to the field of optical communications devices, and more particularly to photonic integrated circuits.

BACKGROUND OF THE INVENTION

Photonic integrated circuits (PIC) provide an integrated technology platform increasingly used to form complex optical circuits. PIC technology allows many optical devices, both active and passive, to be integrated on a single substrate. For example, PICs may comprise integrated lasers, integrated receivers, waveguides, detectors, semiconductor optical amplifiers (SOA), and other active and passive semiconductor optical devices. Monolithic integration of active and passive devices in PICs provides an effective integrated technology platform for use in optical communications.

A particularly versatile PIC platform technology is the integrated twin waveguide (TG) structure. Twin waveguides combine active and passive waveguides in a vertical directional coupler geometry using evanescent field coupling. The TG structure requires only a single epitaxial growth step to produce a structure on which active and passive devices are layered and fabricated. That is, TG provides a platform technology by which a variety of PICs, each with different layouts and components, can be fabricated from the same base wafer. Integrated components are defined by post-growth patterning, eliminating the need for epitaxial regrowth. Additionally, the active and passive components in a TG-based PIC can be separately optimized with post-growth processing steps used to determine the location and type of devices on the PIC.

The conventional TG structure, however, suffers from the disadvantage that waveguide coupling is strongly dependent on device length, due to interaction between optical modes. For PIC devices such as lasers, the interaction between optical modes results in an inability to control the lasing threshold current and coupling to passive waveguides as a consequence of the sensitivity to variations in the device structure itself. The sensitivity variations arise from the interaction between the even and the odd modes of propagation in the conventional TG structure. This interaction leads to constructive and destructive interference in the laser cavity, which affects the threshold current, modal gain, coupling efficiency and output coupling parameters of the device. The conventional TG structure suffers from unstable sensitivity in performance characteristics due to device length, even/odd mode interaction, and variations in the layered structure.

A modified TG structure, referred to as an asymmetric twin waveguide (ATG), disclosed in US Patent Application Serial Number 09,337,785, filed on June 22, 1999, entitled "Twin Waveguide Based Design for Photonic

Integrated Circuits," the contents of which are hereby incorporated by reference in their entirety, addresses some of the performance problems of the conventional TG structure. The ATG structure significantly reduces modal interference by confining different modes of light to propagation in different waveguides. This is accomplished by designing each of the single mode waveguides that are comprised in the twin waveguide such that the mode of light that propagates in each of the two waveguides has a different effective index of refraction. The asymmetric waveguides may be laterally tapered to reduce coupling losses by resonant or adiabatic coupling of the optical energy between the first and second waveguide. The asymmetric waveguide design significantly reduces the interaction between optical modes and therefore represents a great improvement over traditional TG devices.

The ATG promises to be a versatile platform technology. Indeed, the inventors in an article entitled "Efficient Coupling in Integrated Twin-Waveguide Lasers Using Waveguide Tapers" published in volume 11, number 9, of the IEEE Photonic Technology Letters (September 1999), the contents of which are hereby incorporated by reference, suggest a design for integrating lasers using waveguides. Further, in an article entitled "Asymmetric Twin-Waveguide 1.55-μm Wavelength Laser with a Distributed Bragg Reflector," published in volume 12, number 5, IEEE Photonic Tech. Letters (May 2000), the contents of which are hereby incorporated by reference, the inventors have disclosed designs for a laser device based upon the asymmetric twin waveguide design.

While these developments show promise for the ATG design, the need exists to develop the complex circuits often touted but, as of yet, not realized from PIC technology. Specifically, there is a need for improved PIC platforms that combine multiple optical devices, both active and passive, on a single substrate. More particularly, as described in an article by Nisa Hhan and Jim Rue entitled "Manufacturers Focus on the 40Gbit/s Challenge," published in the June/July 2000 edition of FiberSystems International, the contents of which hereby incorporated, there is a need in the art for improved integrated photonic devices such as high speed detectors. Furthermore, there is a need to integrate photo-optical amplifiers with detectors so as to improve detector responsivity.

SUMMARY OF THE INVENTION

Briefly, the present invention meets these and other needs in the art.

According to a first aspect of the invention, an asymmetric twin waveguide photo-detector device is provided. The photo-detector device comprises a coupling waveguide for providing low-coupling loss with an external optical fiber and for guiding primarily a first mode of light, a second waveguide vertically coupled to the first waveguide for guiding primarily a second mode of light having an effective index of refraction different from the first mode, and a photo-detector vertically coupled to the second waveguide. Light received at the coupling waveguide is moved into the second waveguide via a lateral taper in the second waveguide. The photo-detector device adjacent to the second waveguide receives the light propagating in the second waveguide via evanescent coupling.

According to another aspect of the invention there is provided a PIC device comprising more than two vertically stacked asymmetric waveguides. A PIC device with more than two asymmetric waveguides allows for the integration of varied types of devices in a single wafer. For example, while one waveguide may be employed for coupling with another device, a second waveguide may be used to amplify signals, and still another waveguide may be used to transport the amplified signal to another device. Expanding the number of asymmetric waveguides beyond two greatly enhances the number and types of devices that can be devised.

According to another aspect of the invention, an embodiment of a PIC device comprising more than two vertically integrated asymmetric waveguides is disclosed. Specifically, there is provided an asymmetric waveguide based photo-detector device having an optical amplifier integrated therein. The photo-detector device comprises a coupling waveguide designed to provide low-coupling loss with an external optical fiber and which guides primarily a first mode of light, a second waveguide for guiding and amplifying primarily a second mode of light having a higher effective index of refraction than the first mode of light, a third waveguide for guiding primarily a third mode of light having a higher effective index of refraction than the second mode of light, and a photo-detector which is evanescently coupled to the third waveguide. In the amplifier photo-detection PIC, light enters the coupling waveguide and is coupled, via the lateral taper, to the second waveguide comprising an optical amplifier. The light is amplified across the length of the second waveguide and coupled into the third waveguide via a second lateral taper. While propagating in the third waveguide the light is absorbed by the photo-detector that is evanescently coupled to the third waveguide. The amplifier photo-detector device represents just one of the many types of devices that may be devised using more than two vertically stacked asymmetric waveguides.

Photo-detectors and amplifier photo-detectors in accordance with the invention offer substantially improved receiver responsivity. Indeed, detectors in accordance with the invention are operable to receive optical signals transmitted at rates at least up to 40 GHz. Furthermore, the detectors are tolerant of variances resulting during manufacturing. Thus, photo-detectors and amplifier photo-detectors in accordance with the invention are particularly well suited for use in commercial optical communication devices.

Additional aspects of the invention are described in detail below.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Other features of the invention will be further apparent from the following detailed description of presently preferred exemplary embodiments of the invention taken in conjunction with the accompanying drawings, of which:

Figure 1A is a perspective view of a photo-detection PIC in accordance with an aspect of the invention;

Figure 1B is a second perspective view of a photo-detection PIC in accordance with an aspect of the invention;

Figure 2 is a sectional view of a photo-detection PIC in accordance with an aspect of the invention;

Figure 3 is a top plan view of a photo-detection PIC in accordance with an aspect of the invention;

Figure 4 is a flowchart of a process for manufacturing a photo-detection PIC in accordance with an aspect of the invention;

Figure 5 is a graph of the responsivity of a photo-detection PIC in accordance with the invention as a function of the growth rate of its composite layers;

Figure 6 is a graph of the responsivity of a photo-detection PIC in accordance with the invention as a function of the width of the lateral taper formed therein;

Figure 7 is a perspective view of a PIC comprising more than two vertically integrated waveguides in accordance with the invention;

Figure 8 is a perspective view of an asymmetric photo-detection PIC with optical amplifier in accordance with an aspect of the invention; and

Figure 9 is a sectional view of an amplifier photo-detection PIC in accordance with an aspect of the invention;

Figure 10 is a flowchart of a process for manufacturing an amplifier photo-detection PIC in accordance with an aspect of the invention;

Figure 11 provides a graphical representation of the optical power in various portions of an amplifier photo-detection device in accordance with the invention as a function of time;

Figure 12 is a top view of an amplifier photo-detector in accordance with the invention incorporating a filter; and

Figure 13 is a graph of the calculated minimum input power (in dBm) to achieve a bit-error rate of 10^{-9} as a function of amplifier gain.

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

A system and method with the above-mentioned beneficial features in accordance with a presently preferred exemplary embodiment of the invention will be described below with reference to FIGURES 1-13. It will be appreciated by those of ordinary skill in the art that the description given herein with respect to those figures is for illustrative purposes only and is not intended in any way to limit the scope of the invention. All questions regarding the scope of the invention may be resolved by referring to the appended claims.

Generally, the present application is directed toward monolithically integrated asymmetric waveguide structures. An asymmetric twin waveguide (ATG) design has been disclosed in co-pending U.S. Patent Application Serial Number 09/337,785, filed on June 22, 1999, entitled "Twin Waveguide Based Design for Photonic Integrated Circuits," the contents of which are hereby incorporated by reference in their entirety. Generally, the ATG design employs two waveguides wherein each waveguide is designed to guide primarily one mode of light with each mode having a different effective index of refraction. A lateral taper in one of the waveguides induces coupling of light between the waveguides. The lateral taper operates to change the effective refractive index of a mode of light traveling in the first waveguide to a second mode that propagates primarily in the second waveguide. This transition occurs across the length of the taper. Thus, a mode of light having a first index of refraction may begin to propagate in second waveguide at the beginning of a taper, and be transitioned to a second mode of light having a higher effective index of refraction by the end of the taper region which causes the mode to be essentially locked into propagating in the second waveguide.

The present application is directed toward PIC devices having a plurality of vertically integrated waveguides with lateral tapers formed therein. According to a first aspect of the invention, a photo-detection PIC is provided having a photo-detector evanescently coupled to one of a plurality of waveguides. Light received at a first waveguide is coupled into to a second waveguide via a lateral taper in the second waveguide. A photo-detector device on top of the second waveguide receives the light propagating in the second waveguide through evanescent coupling. Thus, light received at the first waveguide is detected by a detector evanescently coupled to the second waveguide.

Figure 1A provides a perspective view of an exemplary photo-detector device in accordance with an aspect of the present invention. As shown, the monolithically integrated photo-detection PIC 110 is situated on substrate 112 and comprises a first waveguide 114, a second waveguide 116, and a detector 118. Photo-detection PIC 110 further comprises n contact 120 and p contact 122. Waveguide 114 is designed to provide a low-coupling loss from a lensed or cleaved single mode optical fiber. In an exemplary embodiment the coupling loss between waveguide 114 and a lensed or cleaved optical fiber is less than 2 dB. Further, waveguide 114 has a far-field pattern angle of between about 13 degrees and 18 degrees in both a vertical and horizontal direction. In the exemplary embodiment, the materials and relative thickness of those materials comprising waveguide 114 have been selected such that a mode of light propagating primarily in waveguide 114 has an effective index of refraction of between about 3.173 and 3.177.

Waveguide 116 is situated on top of and is integrally formed with waveguide 114. Waveguide 116 has been designed to guide primarily one mode of light wherein the mode of light has a higher effective index of refraction than the mode of light propagating in waveguide 114. In an exemplary embodiment, the effective index of refraction of the mode of light propagating in waveguide 116 is between about 3.2 and 3.22. Waveguide 116 has a lateral tapered area 117 to improve the coupling of light from waveguide 114 to waveguide 116. In an exemplary embodiment the coupling loss between waveguide 114 and waveguide 116 is less than 1 dB.

Detector 118 is situated on top of and integrally formed with waveguide 116. In an exemplary embodiment, detector 118 is a PIN type detector comprising a p+ cladding layer, an n+ matching layer, and an InGaAs absorption layer. In an exemplary embodiment, the absorption coefficient between waveguide 116 and detector 118 is such that greater than 80% of the light is absorbed in the span of about 30 μm of the photo-detector. It should be noted that while in the exemplary embodiment detector 118 is separate from waveguide 116, in alternative embodiments, detector 118 might be integrated in waveguide 116.

Light enters photo-detection PIC 110 through waveguide 114, which may be coupled to another device such as, for example an optical fiber. At least a first mode of light propagates through waveguide 114 and upon reaching tapered portion 117 of waveguide 116, begins to propagate in waveguide 116. The effective index of refraction of the first mode increases across the length of taper region 117. As a consequence, upon reaching the wide end of taper region 117, the light propagating in the taper is transitioned into a second mode of light which is primarily confined to waveguide 116. The second mode of light propagating primarily in waveguide 116 is evanescently coupled to detector 118. Over the length of detector 118, sufficient quantities of the evanescent fields can be absorbed to effectively identify the presence of light in waveguide 116.

Figure 1B provides a perspective view of an embodiment of photo-detector device 110. As shown, photo-detector device 110 may further comprise reflector 130. Reflector 130 is positioned adjacent waveguides 114 and 116 and operates to reflect light that is incident thereon.

Accordingly, light propagating in waveguide 114 that is not absorbed in detector 118 upon a first pass, is reflected back in waveguide 114 and can be absorbed during a second pass under detector 118. By providing for a second pass of light under detector 118, reflector 130 potentially increases the responsivity of device 110. Furthermore, because reflector 130 provides for a double-pass of light below detector 118, detector 118 may be physically smaller and still provide the same level of responsivity. Reflector 130 may be comprised of a reflective metal such as, for example, gold or silver. Reflector 130 might also be comprised of a dielectric stack.

An asymmetric waveguide detector in accordance with the invention is characterized by minimum coupling loss and low polarization sensitivity. Indeed, the responsivity of the detector is largely independent of polarization. These characteristics of the invention are, in part, a function of the physical composition of the waveguides.

Figure 2 provides an exemplary sectional view of photo-detection PIC 110. As shown, PIC 110 is grown on a semi-insulating or doped InP substrate 112. Coupling waveguide 114 comprises five 500Å thick InGaAsP (bandgap E_g = 1.03eV) layers 210 interspersed between six 0.55 μm thick InP layers 212. The composition of waveguide 114 has been designed such that a mode of light propagating primarily in waveguide 114 has an effective index of refraction of between about 3.173 and 3.177.

Waveguide 116 comprises a central InGaAsP layer 214 having a thickness of between 0.25 and 0.29 μm.

Waveguide 116 further comprises two 300 Å InGaAsP layers 216, one on either side of central layer 214, each of which is positioned between two 900 Å thick InP layers 218. Waveguide 116 has been designed such that a mode of light propagating primarily in waveguide 116 has an effective index of refraction of between about 3.2 and 3.22. In accordance with the asymmetric design of the PIC 110, layers 214, 216, and 218 result in a mode of light that propagates primarily in waveguide 116 having a higher effective index of refraction than that of the mode propagating primarily in waveguide 114.

A 0.15 μm thick n-doped layer 220 is positioned between waveguide 116 and PIN detector 118 to increase evanescent coupling and absorption. PIN detector 118 comprises n-doped layer 222 which is between about 0.1 and 0.3 μm thick, an $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ absorption layer 224 which is between about 0.5 and 0.6 μm thick, and a p-doped InP layer 226 which is about 0.6 μm thick. One skilled in the art will recognize that in an alternative embodiment, the polarity of the doping layers in the PIN structure may be reversed to form a p+ bottom layer, undoped InGaAs layer and a top n+ layer.

The low coupling loss and low polarization sensitivity associated with the present invention is also a function of lateral taper 117. In addition, a lateral taper in accordance with the invention is tolerant of variations in width associated with fabrication imperfections. A lateral taper with a slow or adiabatic change in width over a relatively long length, such as, for example 1 mm, may exhibit such characteristics. The inventors, however, have created an asymmetric waveguide design, which provides the low coupling loss, low polarization sensitivity, and tolerance of fabrication imperfections, using a lateral taper of significantly shorter proportions, i.e. between about 250 and 400 μm.

Figure 3 provides a top view of photo-detection PIC 110. In the exemplary embodiment, the width of the coupling guide 114, referred to herein as W_{FIB}, is 5 μm. The width of the tapered end of waveguide 116, referred to herein as W_{TAPEND}, is 1 μm. The width of the taper at one point, which in the exemplary embodiment is the taper's widest point, referred to herein as W_{TAP}, is between about 1.8 and 2.2 μm. The length of the taper from its end to the point corresponding to W_{TAP}, which is referred to herein as L_{TAP}, is between about 250 and 400 μm. The above described values for W_{TAPEND}, W_{TAP}, and L_{TAP} result in a lateral taper angle, θ, of between about 0.05 and 0.09 degrees. The length of detector 118, which is referred herein as L_{DET}, is between about 20 and 50 μm.

Photo-detection PIN 110 is manufactured through a series of masking and etching steps. Figure 4 provides a flowchart of a process for manufacturing a photo-detection PIN in accordance with an aspect of the invention. As shown, at step 410, a monolithic structure comprising layers as described above with reference to Figure 2 is grown by molecular beam epitaxy (MBE) or metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD), for example, in a single epitaxial step on InP substrate 112. At step 412, the outline of detector

122 is defined via masking and the surrounding layers etched away to the top of waveguide 116. At step 414, waveguide 116 with lateral taper 117, is defined via masking and the surrounding areas etched away to the top of waveguide 114. At step 416, an outline of waveguide 114 is defined via masking and the surrounding areas etched away to the top of substrate 112.

As has been previously noted, the efficiency of transfer of light, i.e. the coupling loss and polarization sensitivity, between waveguide 112 and waveguide 114 is dependent on the asymmetry between the two waveguides and the dimensions of taper 117. With respect to waveguide asymmetry, the inventors have used the same InGaAsP growth material, assumed to be deposited at the same growth rate, in both waveguides. The degree of asymmetry between guides is determined by the growth times for the various InGaAsP layers that make up the two guides and not by differences in the composition of the material layers. Furthermore, any drift in the InGaAsP growth rate, which may be ± 10%, affects both waveguides.

Figure 5 provides a graph of the responsivity (in amperes per watt) of a detector in accordance with the invention as a function of the growth rate of the InGaAsP layers that comprise the detector. The growth rate variation is normalized with respect to a particular layer design that yields high responsivity in this detector structure. As shown, where the growth rate of the InGaAsP layers is between about 0.9 and 1.1, or a ± 10% variation, the responsivity of the detector is largely unaffected by the variation and is above 0.8 A/W. Thus, the detector performance (responsivity) is tolerant to growth rate variations that may occur during deposition of the InP and/or InGaAsP layers of the structure.

With respect to the design of lateral taper 117, the inventors have selected design parameters to minimize the coupling losses between the waveguide 114 and waveguide 116 and thereby increase the responsivity of the detector. Also, lateral taper 117 is designed to provide performance that is largely independent of variations resulting from fabrication imperfections.

Figure 6 provides a graph of the responsivity of a detector in accordance with an aspect of the invention as a function of the width of the lateral taper. As shown in Figure 6, for a taper with a width at the tapered end (W_{TAPEND}) of 1.0 μm, and a taper length (L_{TAP}) equal to 400 μm, the highest responsivity from detector 118 is obtained when the width of the taper at its widest point (W_{TAP}) is between about 1.8 and 2.2 μm.

Figures 5 and 6 confirm that a photo-detection device having the above-described measurements is highly responsive. Indeed, a photo-detection device having the above-described properties is suitable for use at speeds of at least up to 40GHz. The inventors have empirically concluded that for the exemplary embodiment of the photo-detection device the polarization sensitivity is less than 0.5 dB. Furthermore, because the photo-detector is tolerant of variances resulting from manufacturing imperfections in addition to being operable at very high speeds, it is particularly well suited for use in commercial optical communications equipment.

According to another aspect of the invention there is provided a PIC device comprising more than two vertically coupled asymmetric waveguides. A PIC device with more than two vertically coupled asymmetric waveguides allows for the integration of numerous and varied types of devices in a single wafer. For example, while one waveguide may be employed for coupling with another device, a second waveguide may be used to amplify signals, and still another waveguide may be used to transport the amplified signal to another device. Expanding the number of asymmetric waveguides beyond two greatly enhances the number and types of devices that can be devised in a single wafer.

Figure 7 provides a perspective view of an exemplary PIC device comprising more than two vertically coupled asymmetric waveguides. As shown, PIC 710 comprises first waveguide 712, second waveguide 714, and third waveguide 716. The materials and relative thickness of those materials that comprise waveguides 712, 714, and 716 are selected such that a different mode of light, each having a different effective index of refraction, propagates primarily in one of the waveguides. Lateral tapers are formed in the waveguides to control the movement of light between waveguides. For example, waveguide 714 has lateral taper 718 formed therein for coupling light between waveguide 712 and waveguide 714. Likewise, waveguide 716 has lateral taper 720 formed therein for moving light between waveguide 716 and waveguide 714.

Waveguides 712, 714, and 716 may be employed to provide active and passive devices on a single substrate. For example, the waveguides may be used to provide active devices such as, for example, semiconductor optical amplifiers, and lasers. Also, the waveguides may be employed to provide passive devices such as, for example, detectors, couplers, splitters, Mach Zehnder interferometers, grating sections, and arrayed waveguide (AWG) routers. Of course, waveguides 712, 714, and 716 may be used simply to transport light from one device to another.

Thus, according to an aspect of the invention, more than two vertically integrated waveguides are provided that have been designed such that a particular mode of light propagates primarily in each of the waveguides. Lateral tapers are formed in the waveguides to control the transfer of the modes of light between waveguides. Further, active and passive devices may be designed around the waveguides. It is, therefore, possible to combine active and passive devices on a single chip in numerous combinations to form varied types of complex PIC devices.

An amplifier photo-detection PIC represents an exemplary embodiment of a PIC device comprising more than two vertically coupled asymmetric waveguides. In the amplified photo-detection PIC, light enters a first waveguide and is coupled to a second waveguide comprising an optical amplifier. The amplifier may be a semiconductor optical amplifier (SOA) or traveling wave amplifier (TWA). After being amplified over the length of the second waveguide, the light is coupled into a third waveguide, and ultimately absorbed by a photo-detector which is evanescently coupled to the third waveguide.

Figure 8 provides a perspective view of an exemplary asymmetric photo-detection PIC having an optical amplifier in accordance with the invention. As shown, the monolithically integrated photo-detection PIC 810 is situated on substrate 812 and comprises coupling waveguide 814, amplifying waveguide 816, a third waveguide 818, and a detector 820. Waveguide 814 is about 5 μm wide and is designed to provide a low-coupling loss, for example, less than 2dB, from a lensed or cleaved single mode optical fiber. Waveguide 814 has a far-field pattern angle of between about 13 degrees and 18 degrees in both a vertical and horizontal direction. Waveguide 814 is designed such that a first mode of light propagates primarily in waveguide 814. In an exemplary embodiment, the first mode of light has an effective index of refraction of about 3.2.

Amplifying waveguide 816 is situated on top of and is integrally formed with waveguide 814. Waveguide 816 has an optical amplifier formed therein that may contain, for example, multiple quantum wells (MQWs) or a bulk active region. Waveguide 816 is designed such that a second mode of light propagates primarily in the waveguide 816. In accordance with the asymmetric waveguide design, the second mode of light propagating in the second waveguide 816 has an effective index of refraction of about 3.32 which is greater than the effective index of refraction associated with the first mode of light propagating in waveguide 814. Waveguide 816 has a lateral tapered area 817 to improve the coupling of light from waveguide 814 to waveguide 816. In an exemplary embodiment, the coupling loss between waveguide

816 and waveguide 814 is less than 1db.

Waveguide 818 is situated on top of and is integrally formed with waveguide 816. Waveguide 818 is designed such that a third mode of light propagates primarily in the waveguide. In accordance with the asymmetric waveguide design, the third mode of light propagating in waveguide 818 has an effective index of refraction of about 3.37 which is greater than the effective index of refraction associated with the second mode of light propagating in waveguide 816. Waveguide 818 also has a lateral tapered area 819 to improve the coupling of light from waveguide 816 to waveguide 818. In an exemplary embodiment, the coupling loss between waveguide 818 and waveguide 816 is less than 1db. It should be noted that while in the exemplary embodiment tapers sections 819 and 817 do not overlap, in alternative embodiments, tapers 817 and 819 could overlap partially or even entirely, depending upon the application.

Detector 820 is situated on top of and integrally formed with waveguide 818. In an exemplary embodiment, detector 820 is between about 20 and 50 μm long and is a PIN type detector comprising p+ cladding layer 830, n+ matching layer 832, and an InGaAs absorption layer 834. The polarity of the doping layers in the PIN structure may be reversed from that shown. The absorption coefficient between waveguide 818 and detector 820 is greater than 80% in the span of 30 μm of photo-detector 820. It should be noted that while in the exemplary embodiment detector 820 is a component separate from waveguide 818, in alternative embodiments, detector 820 might be integrated in waveguide 818.

Waveguide 818 comprises an extension area 840 which extends in front of taper area 819. Top surface 842 of waveguide 818 provides a first contact area for activating the amplifier comprised in waveguide 816. In the exemplary embodiment, the contact is a p+ contact. The second contact for activating the amplifier of waveguide 816 is top surface 844 of waveguide 814. In the exemplary embodiment, the second contact is an n+ contact. Applying a voltage across the contacts activates the amplifier comprised in waveguide 816 which causes light propagating therein to be amplified.

Light enters photo-detection PIC 810 via waveguide 814, which may be coupled to another device such as, for example an optical fiber. At least a first mode of light propagates through waveguide 814 and upon reaching tapered portion 817 of waveguide 816, begins to propagate in waveguide 816. The effective index of refraction of the first mode increases across the length of taper region 817. As a consequence, upon reaching the wide end of taper region 817, the light propagating in the taper is transitioned into a second mode of light which is primarily confined to waveguide 816. While propagating in waveguide 816, the light experiences gain as a result of the optical amplifier therein. The second mode of light propagating primarily in waveguide 816, upon reaching tapered portion 819 of waveguide 818, begins to propagate in waveguide 818. The effective index of refraction of the second mode increases across the length of taper region 819. As a consequence, upon reaching the wide end of taper region 819, the light propagating in the taper is transitioned into a third mode of light which is primarily confined to waveguide 818. Waveguide 818 is evanescently coupled to detector 820. Sufficient quantities of the evanescent fields can be absorbed across a short distance, for example 20 to 100 μm, of detector 820 to effectively identify the presence of light in waveguide 818.

Figure 9 provides a cross sectional view of an exemplary asymmetric photo-detector PIC having an optical amplifier in accordance with an aspect of the invention. As shown, PIC 810 is grown on a semi-insulating substrate 812, which in an exemplary embodiment is composed of InP. Coupling waveguide 814 comprises InGaAsP layer 910, which is about 3 μm thick. In an alternative embodiment, coupling waveguide 814 might comprise several thin InGaAsP layers having a higher index of refraction interspersed with InP layers to form a single-mode diluted waveguide. Referring to Figure 9, waveguide 816 comprises three InGaAsP quantum wells 912 positioned between two confinement heterostructure layers 914 each of which is about 0.15 μm thick. The quantum wells are tensile and compressive strained to form a polarization insensitive optical amplifier. Waveguide 818 comprises InGaAsP layer 914 which is about 0.6 μm thick. Detector 818 comprises n-doped layer 916, InGaAs absorption layer 918, and p-doped InP layer 920. In alternative embodiment, the polarity of the doping layers in the PIN structure may be reversed to form a p+ bottom layer, an undoped InGaAs layer and a top n+ layer.

Asymmetric photo-detection PIC 810 is manufactured through a series of masking and etching steps. Figure 10 provides a flowchart of a process for manufacturing a photo-detection PIN in accordance with an aspect of the invention. As shown, at step 1010, a monolithic structure comprising layers as described above with reference to Figure 9 is grown by MBE or MOCVD, for example, in a single epitaxial step on InP substrate 112. At step 1012, the outline of detector 820 is defined via masking, and the surrounding layers etched away to the top of waveguide 818. At step 1014, waveguide 818, which has lateral taper 819 formed therein, is defined via masking and the surrounding areas etched away to the top of waveguide 816. At step 1016, the outline of waveguide 816 is defined via masking and the surrounding areas etched away to the top of waveguide 814. At step 1018, an outline of waveguide 814 is defined via masking and the surrounding areas etched away to the top of substrate 112. At step 1020 contacts are formed on detector 820 and amplifying waveguide 816.

The inventors have empirically concluded that an amplifier photo-detection PIC 810 as described above is operable. Figure 11 provides a graphical representation of the optical power along the length of amplifier photo-detection device 810 for light injected into coupling waveguide 814. On the left side of Figure 11 a top view of the amplified photo-detector 810 is shown. Coupling waveguide 814, lateral tapers 817 and 819, and detector 820 are illustrated. As optical power propagates through device 810, the various components experience varying levels of power.

The corresponding graph shown on the right side of Figure 11 illustrates the power experienced at the different sections of detector PIC 810 as a function of time. Line 1110 represents the power experienced by coupling waveguide 814. Line 1112 represents the power experienced in amplifying waveguide 816. Line 1114 represents the power experienced in waveguide 1116. Line 1116 represents the total power in the system.

Optical power entering device 810 initially encounters coupling waveguide 814. Accordingly, line 1110, which represents the power in waveguide 814, initially has a non-zero value. As an optical signal propagates in device 810, it experiences taper 817 of waveguide 816, wherein the power is coupled into waveguide 816. Accordingly, line 1112, which represents the power in waveguide 816, begins to rise at the location of taper 817. Line 1112 continues to rise across the length of waveguide 816 illustrating the amplifying characteristics of waveguide 816. An optical signal propagating in device 810 next encounters taper 819, wherein the power is coupled into waveguide 818. Accordingly, line 1116, which represents the power in waveguide 818, begins to rise at the location of taper 819. Finally, optical power propagating all the way through device 810 is absorbed into detector 820. Accordingly, at the location corresponding to the beginning of detector 820, power in all portions of device, as indicated by lines 1110, 1112, 1114, and 1116, quickly falls off.

Thus, an asymmetric amplifier photo-detector in accordance with an aspect of the invention is operable to amplify optical power prior to absorption by a photo-detector. The amplification of the optical signal prior to detection improves receiver responsivity. This is especially important for signals having higher bit rates where thermal noise of the electrical amplifier dominates the detector sensitivity.

It is known that amplified spontaneous emission (ASE) can interfere with the responsivity of a receiver. Accordingly, it may be desirable to incorporate a filter into a photo-detector device to reduce ASE. Figure 12 provides a top plan view of a detector device in accordance with the invention that incorporates an ASE filter. As shown, device 1210 comprises a coupling waveguide 1212, a second waveguide 1214 having an optical amplifier therein, and a third waveguide 1216 with a detector 1218 coupled thereto. Device 1210 further comprises a grating filter 1220 positioned between second waveguide 1214 and third waveguide 1216. As described in detail in an article by Alferness et al., entitled "Grating-Assisted InGaAsP/InP Vertical Codirectional Coupler Filter", 55 Applied Physics Letters at 2011-13 (November, 1989), the contents of which are hereby incorporated by reference in their entirety, a grating filter operates to eliminate ASE and the shot noise induced by the ASE which could interfere with the responsivity of the receiver. The light exiting waveguide 1214 is filtered by grating filter 1220 prior to entering waveguide 1216. In the exemplary embodiment of Figure 12, grating filter 1220 is a parallel coupler grating wherein the grating filter operates across two parallel waveguides. In an alternative embodiment, grating filter 1220 may be a straight-on grating, without the parallel coupler. It should be noted that grating filter 1220 might also be tunable, allowing for the selective filtering of wavelengths. In such an embodiment, grating filter 1220 can be modulated, or tuned to allow a specific wavelength of light to be incident on the detector section coupled to waveguide 1216.

Figure 13 illustrates the improvement in receiver responsivity resulting from amplification such as that provided by an amplifier photo-detector in accordance with the invention. Figure 13 is a graph of the calculated minimum input power (in dBm) that can be detected at the photo-detector in order to obtain a bit-error rate of 10^{-9} as a function of amplifier or SOA gain. Dotted line 1310 represent the minimum input power that can be detected in 40 GBps detector, which does not have an amplifier therein, in order to achieve a bit-error rate of 10^{-9}. Similarly, dotted line 1312 represent the minimum power that can be detected in a 10 GBps detector, which also does not have an amplifier therein, in order to achieve a bit-error rate of 10^{-9}. Because lines 1310 and 1312 represent photo-detectors without an amplifier element, the lines are horizontal.

By comparison, line 1314, which represents the minimum input power that can be detected in order to obtain a bit error rate of 10^{-9} in a 40 gigabit amplifier detector, falls off quickly as amplification increases. Dotted line 1316 represents the minimum input power that can be detected for a 40 gigabit amplifier detector having a filter therein. Line 1318 represents the minimum input power that can be detected in order to obtain a bit error rate of 10^{-9} in a 10 gigabit amplifier detector. Dotted line 1320 represents the input power that can be detected for a 10 gigabit amplifier detector having a filter therein.

As illustrated by lines 1314 and 1318, the minimum input power that can be detected to achieve a bit error rate of 10^{-9} decreases as the amplifier gain in the amplifier photo-detector increases. When the gain increases to beyond about 15 dB, the input power needed to achieve the desired bit error rate begins to level off. Comparing line 1310, which corresponds to a 40 GBps detector without an amplifier, and line 1314, which corresponds to a 40 GBps detector with an amplifier, it can be seen that where the gain in the detector exceeds about 15 dB, the amount of input power that can be received at the detector in order to obtain the desired bit error rate is reduced by approximately 10 dB. Thus, a significant increase in detector responsivity is achieved through the use of pre-amplification. Furthermore, as illustrated by lines 1316 and 1318, adding a filter to reduce ASE results in an even more responsive amplifier detector where the amplifier gain is above about 15 dB. However, it should be noted that for higher baud rate detectors such as, for example, the 40 gigabit detector represented by lines 1314 and 1316, the filter does not improve responsivity as greatly as for lower baud rate receivers such as, for example, the 10 gigabit detector represented by lines 1318 and 1320.

Thus, there have been disclosed improved monolithic integrated photo-detector devices and improved PIC device designs. According to an aspect of the invention, an asymmetric waveguide based photo-detector PIC is provided. The exemplary embodiment of the improved photo-detector PIC is highly responsive and is operable for use at frequencies at least as high as 40 GHz.

There has further been disclosed a design for incorporating more than two vertically coupled asymmetric waveguides having lateral tapers in a single PIC device. For example, according to an aspect of the invention, there has been disclosed an amplifier optical-detector PIC. The PIC improves upon existing asymmetric detector designs by amplifying signals prior to detection. The amplified signal provides for greater accuracy of detection by diminishing inaccuracies introduced by noise in the electronic detection circuit.

The amplifier optical-detector PIC is an example of the integration of multiple asymmetric waveguides and multiple device types, i.e. passive waveguides, amplifiers, and detectors, in a single PIC. The multiple asymmetric waveguide design can be applied to form other types of devices. In devices incorporating the present invention, passive waveguides may be used for efficient coupling to fibers and to form various passive devices such as, for example, couplers, splitter, Mach Zehnder interferometers, and arrayed waveguide (AWG) routers. In the same devices, optical amplifiers may be used to provide optical pre-amplification or to compensate for losses associated with communicating with PICs containing other passive components. Finally, these same devices may incorporate detectors, perhaps operating in an array of detectors, wherein each is capable of high-speed, low-noise, high dynamic range operation up to and beyond 40GHz. Thus, the inventors have created a multiple asymmetric waveguide design that may be used to provide the types of complex PICs that to this point have not been realized.

While the invention has been described and illustrated with reference to specific embodiments, those skilled in the art will recognize that modification and variations may be made without departing from the principles of the invention as described above and set forth in the following claims. For example, an integrated optical detector in accordance with the invention may comprise a taper having different measurements than those described. Also, the waveguides may be composed of materials different than those mentioned above such as, for example, GaAs, GaSb, and GaN, and may have thicknesses other than those described. Furthermore, the invention may be employed in a wide variety of devices. For example, an integrated amplifier optical-detector in accordance with the invention may be employed to make high sensitivity 40GHz receivers for optical communication links. Accordingly, reference should be made to the appended claims as indicating the scope of the invention.

CLAIMS

What is claimed is:

1. A device for operating on an optical signal comprising:

a first waveguide for guiding primarily a first mode of light;

a second waveguide for guiding primarily a second mode of light, said second waveguide positioned vertically relative to said first waveguide, wherein said second waveguide has a lateral taper formed therein for guiding said first mode of light between said first waveguide and said second waveguide and wherein said first mode of light has an effective index of refraction different from that of said second mode of light; and

a photo-detector for detecting light propagating in said second waveguide, said photo-detector positioned vertically relative to said second waveguide and being separated from said first waveguide by said second waveguide.

2. The device of claim 1, wherein said second mode of light has an effective index of refraction greater than that of said first mode.

3. The device of claim 1, wherein said lateral taper is about 1 μm wide at a first point and is between about 1.8 and 2.2 μm wide at a second point, and the length of the taper between said first point and said second point is between about 250 and 400 μm.

4. The device of claim 1, wherein said lateral taper is between about 250 and 400 μm in length, said

lateral taper has a tapered end with a width of about 1 μm, and said lateral taper is at least between about 1.8 and 2.2 μm in width at a point along the length of said lateral taper.

5. The device of claim 1, wherein said lateral taper has a taper angle of between about .05 and .09 degrees.

6. The device of claim 1, wherein said first mode of light has an effective index of refraction of between about 3.173 and 3.177 and said second mode of light has an effective index of refraction between about 3.2 and 3.22.

7. The device of claim 1, wherein said lateral taper is an adiabatic taper.

8. The device of claim 1, wherein said first waveguide has an input coupling loss from a cleaved or lensed fiber of less than 2 dB.

9. The device of claim 1, wherein said first waveguide has a far-field pattern angle of between about 13 degrees and 18 degrees in a vertical direction and a horizontal direction.

10. The device of claim 1, wherein said second waveguide has a coupling loss with said first waveguide of less than 1 dB and has an absorption coefficient with said photo-detector of greater than 80% across 30 μm of the photodetector.

11. The device of claim 1, wherein said second waveguide further comprises a reflector for reflecting light propagating in said second waveguide causing the light to propagate under said detector a second time.

12. The device of claim 11, wherein said reflector comprises a metal coating.

13. The device of claim 11, wherein said reflector comprises a dielectric stack.

14. The device of claim 1 wherein the photodetector is a PIN device.

15. The device of claim 14, wherein said PIN device comprises an $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ absorption layer.

16. A device for operating on an optical signal comprising:

a first waveguide for guiding primarily a first mode of light;

a second waveguide for guiding primarily a second mode of light, said second waveguide positioned vertically relative to said first waveguide, wherein said second waveguide has a lateral taper formed therein for guiding said first mode of light between said first waveguide and said second waveguide and wherein said first mode of light has an effective index of refraction different from that of said second mode of light; and

at least one further waveguide for guiding primarily a third mode of light, said further waveguide positioned vertically relative to said second waveguide and separated from said first waveguide by said second waveguide, wherein said further waveguide has a lateral taper formed therein for guiding said second mode of light between said second waveguide and said further waveguide and wherein said third mode of light has an effective index of refraction different from that of said second mode of light.

17. The device of claim 1, wherein said second mode of light has an effective index of refraction greater than that of said first mode.

18. The device of claim 17, wherein said third mode of light has an effective index of refraction greater than that of said second mode.

19. The device of claim 16 wherein said lateral taper in said further waveguide is positioned substantially adjacent to said taper in said second waveguide.

20. The device of claim 16, wherein said further waveguide comprises a photodetector.

21. The device of claim 16, further comprising a photo-detector for detecting light propagating in said further waveguide, said photo-detector positioned vertically relative to said further waveguide and being separated from said second waveguide by said further waveguide.

22. The device of claim 21, wherein said second waveguide comprises an optical amplifier.

23. The device of claim 16, wherein at least one of said first waveguide, said second waveguide, and said further waveguide is employed to form an active photonic device.

24. The device of claim 23, wherein at least one of said first waveguide, said second waveguide, and said further waveguide is employed to form a passive photonic device.

25. A detector for operating on an optical signal comprising:

a first waveguide for guiding primarily a first mode of light;

a second waveguide for guiding primarily a second mode of light, said second waveguide positioned vertically relative to said first waveguide, wherein said second waveguide has a lateral taper formed therein for guiding said first mode of light between said first waveguide and said second waveguide and wherein said first mode of light has an effective index of refraction different from that of said second mode of light;

at least one further waveguide for guiding primarily a third mode of light, said further waveguide positioned vertically relative to said second waveguide and separated from said first waveguide by said second waveguide, wherein said further waveguide has a lateral taper formed therein for guiding said second mode of light between said second waveguide and said further waveguide and wherein said third mode of light has an effective index of refraction different from that of said second mode of light; and a photo-detector for detecting light propagating in said further waveguide, said photo-detector positioned vertically relative to said further waveguide and being separated from said second waveguide by said further waveguide.

26. The detector of claim 25, wherein said second waveguide comprises an optical amplifier.

27. The detector of claim 25, wherein said photodetector is a PIN device.

28. A device for operating on an optical signal comprising:

a first waveguide for guiding primarily a first mode of light;

a second waveguide for guiding primarily a second mode of light, said second waveguide positioned vertically relative to said first waveguide, wherein said second waveguide has a lateral taper formed therein for guiding said first mode of light between said first waveguide and said second waveguide and wherein said first mode of light has an effective index of refraction different from that of said second mode of light, and said second waveguide comprises an optical amplifier for amplifying the optical signal;

at least one further waveguide for guiding primarily a third mode of light, said further waveguide positioned vertically relative to said second waveguide and separated from said first waveguide by said second waveguide, wherein said further waveguide has a lateral taper formed therein for guiding said second mode of light between said second waveguide and said further waveguide and wherein said third mode of light has an effective index of refraction different from that of said second mode of light; and

a photo-detector for detecting light propagating in said further waveguide, said photo-detector positioned vertically relative to said further waveguide and being separated from said second waveguide by said further waveguide.

29. The device of claim 28, wherein said second mode of light has an effective index of refraction greater than that of said first mode.

30. The device of claim 29, wherein said third mode of light has an effective index of refraction greater than that of said second mode.

31. The detector of claim 30, wherein said first mode of light has an effective index of refraction in said first waveguide of about 3.2, said second mode of light has an effective index of refraction in said second waveguide of about 3.32, and said third mode of light has an effective index of refraction in said further waveguide of about 3.37.

32. The device of claim 28, wherein said first waveguide has an input coupling loss from a cleaved or lensed fiber of less than about 2 dB.

33. The device of claim 28, wherein said first waveguide has a far-field pattern angle of between about 13 degrees and 18 degrees in a vertical direction and a

horizontal direction.

34. The device of claim 28, wherein said further waveguide has a coupling loss with said second waveguide of less than 1 dB and has an absorption coefficient with said photo-detector of greater than 80% across 30 μm of the photodetector.

35. The device of claim 28, wherein said further waveguide further comprises a reflector for reflecting light propagating in said second waveguide causing the light to propagate under said detector a second time.

36. The device of claim 28, wherein said second waveguide provides gain of up to about 20db to said second mode of light.

37. The device of claim 28, further comprising a grating filter for filtering said second mode of light to remove amplified spontaneous emission prior to said second mode of light being coupled into said further waveguide.

38. The device of claim 37, wherein said grating filter is a parallel coupler grating filter.

39. The device of claim 37, wherein said grating filter is a straight grating filter.

40. The device of claim 37, wherein said grating filter is tunable to allow a specific wavelength of light to be incident on said further waveguide.

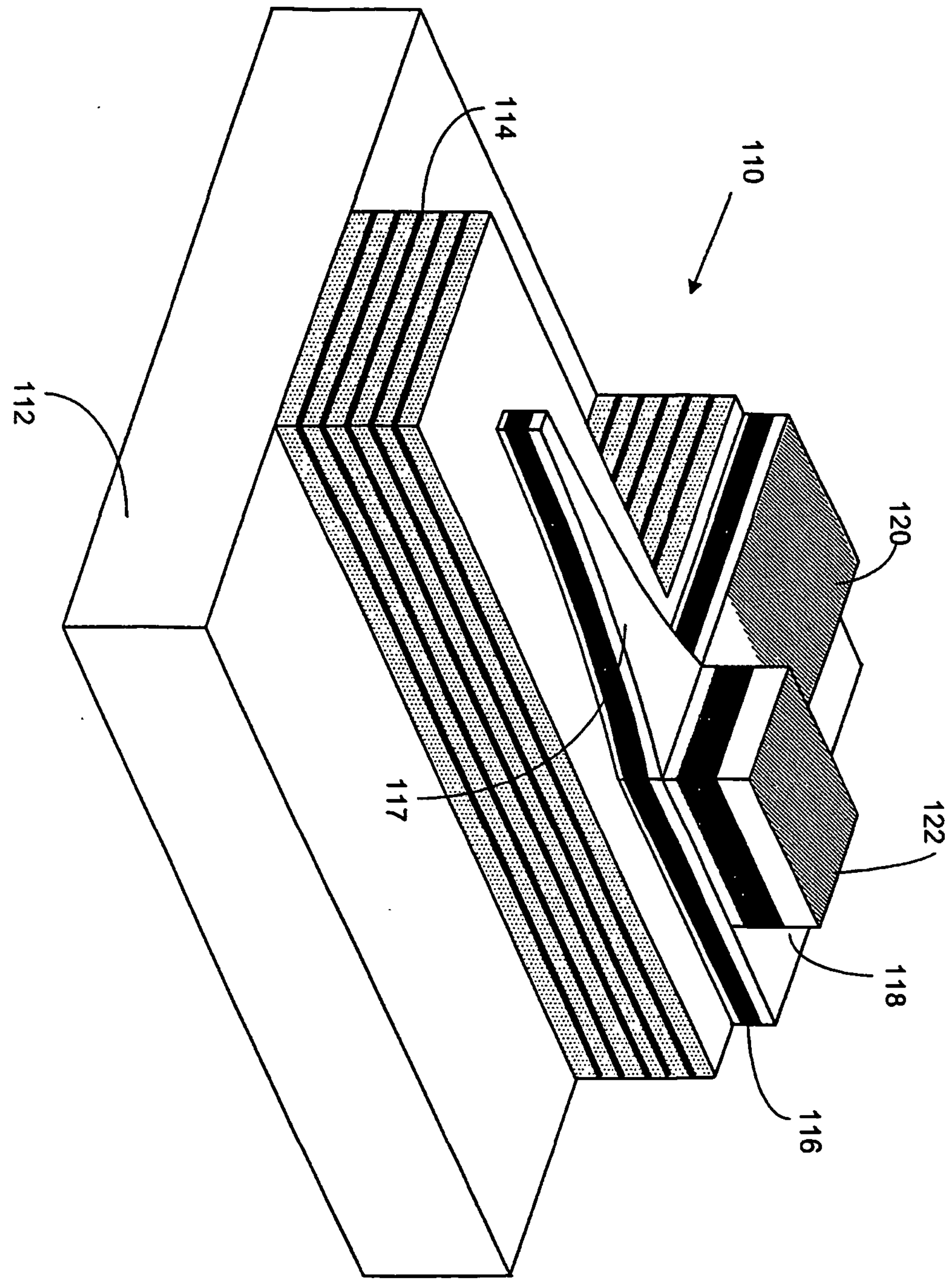


Fig. 1A

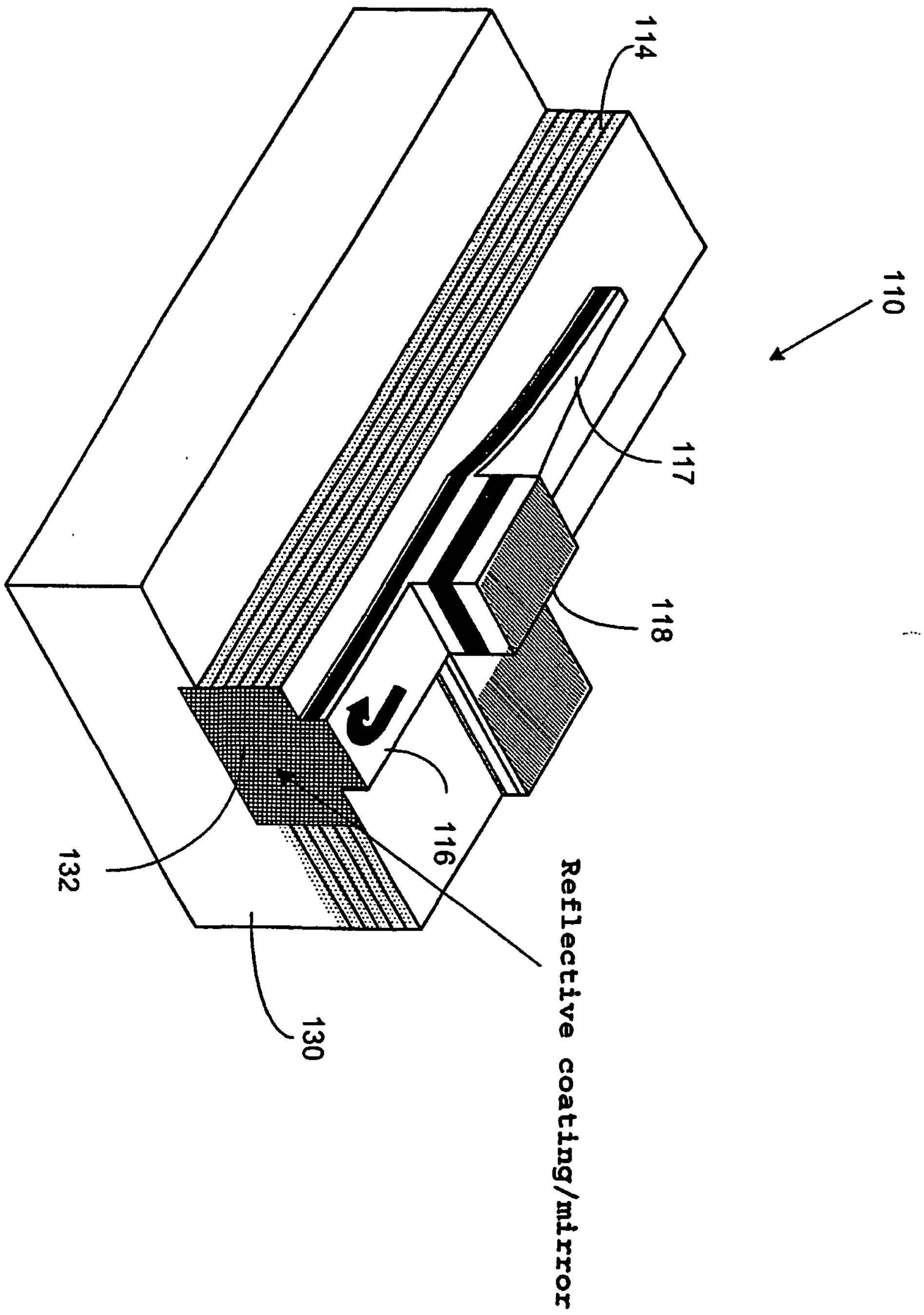


FIG. 1B

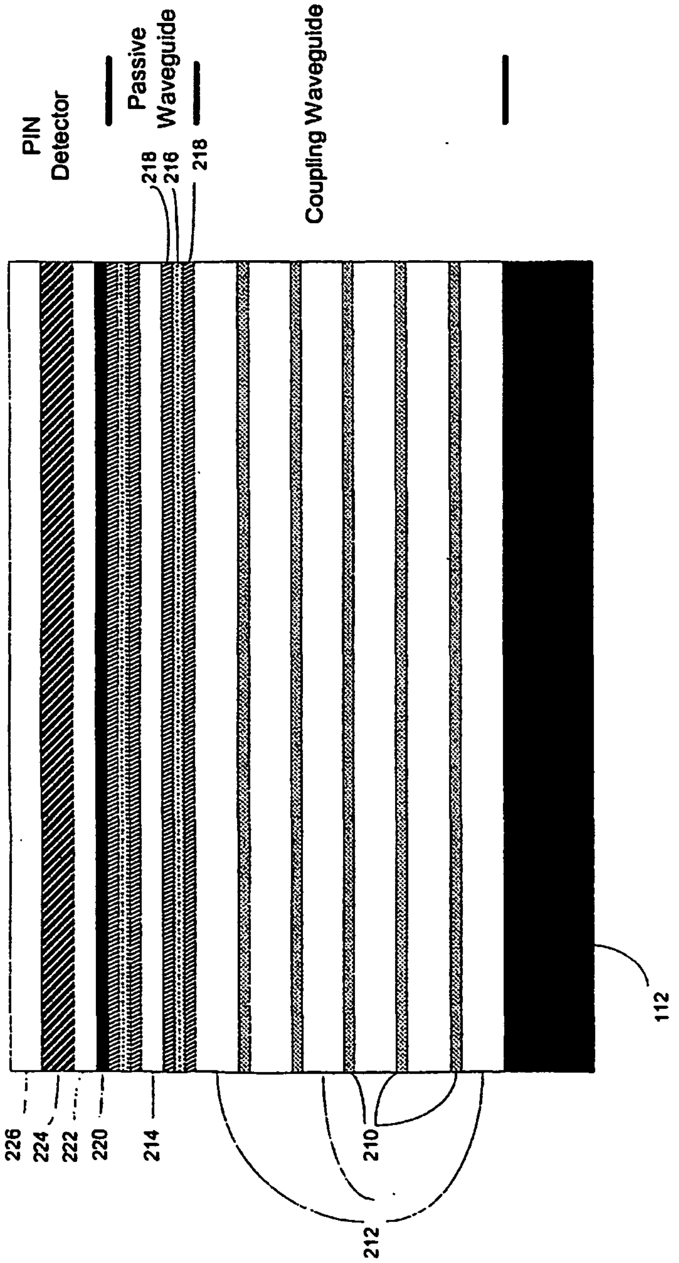

PIN Detector
Passive Waveguide
Coupling Waveguide

Fig. 2

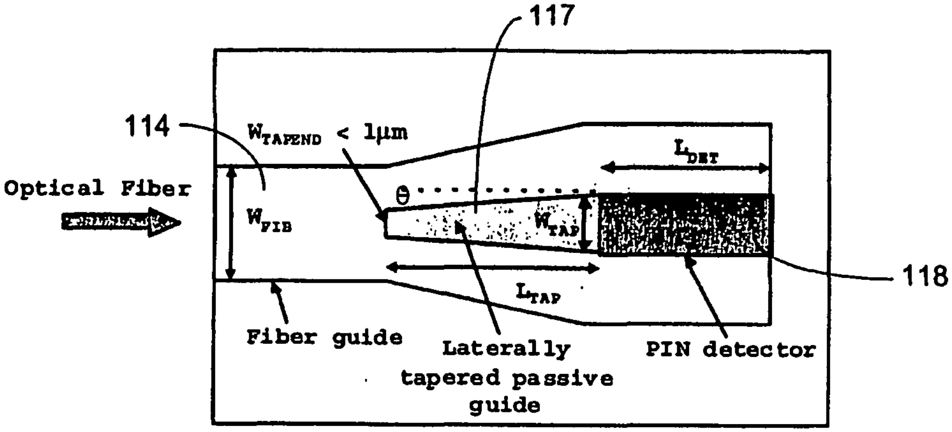

117
114
W_{TAPEND} < 1μm
L_{DET}
Optical Fiber
θ
W_{FIB}
W_{TAP}
118
L_{TAP}
Fiber guide
Laterally tapered passive guide
PIN detector

Fig. 3

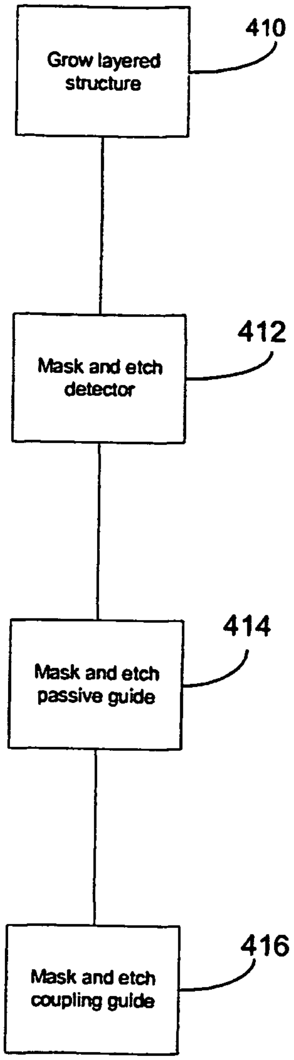

Grow layered structure
410
Mask and etch detector
412
Mask and etch passive guide
414
Mask and etch coupling guide
416

Fig. 4

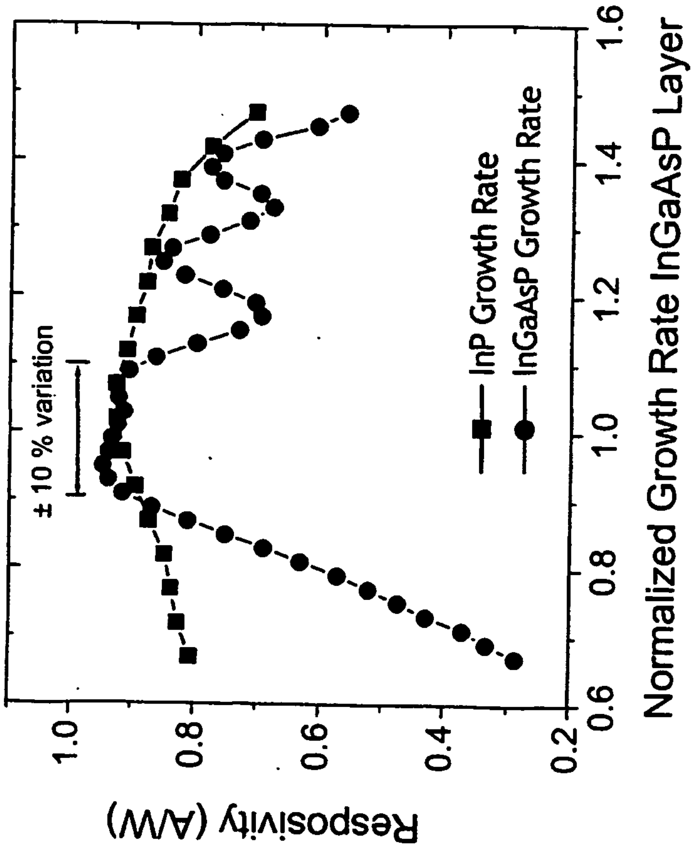

± 10 % variation
InP Growth Rate
InGaAsP Growth Rate
Responsivity (A/W)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
Normalized Growth Rate InGaAsP Layer

Fig. 5

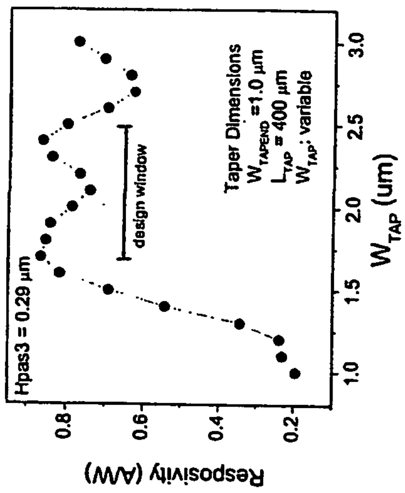

Hpas3 = 0.29 µm
design window
Taper Dimensions
W_{TAPEND} =1.0 µm
L_{TAP} = 400 µm
W_{TAP}: variable
Responsivity (A/W)
0.8
0.6
0.4
0.2
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
W_{TAP} (um)

Fig. 6

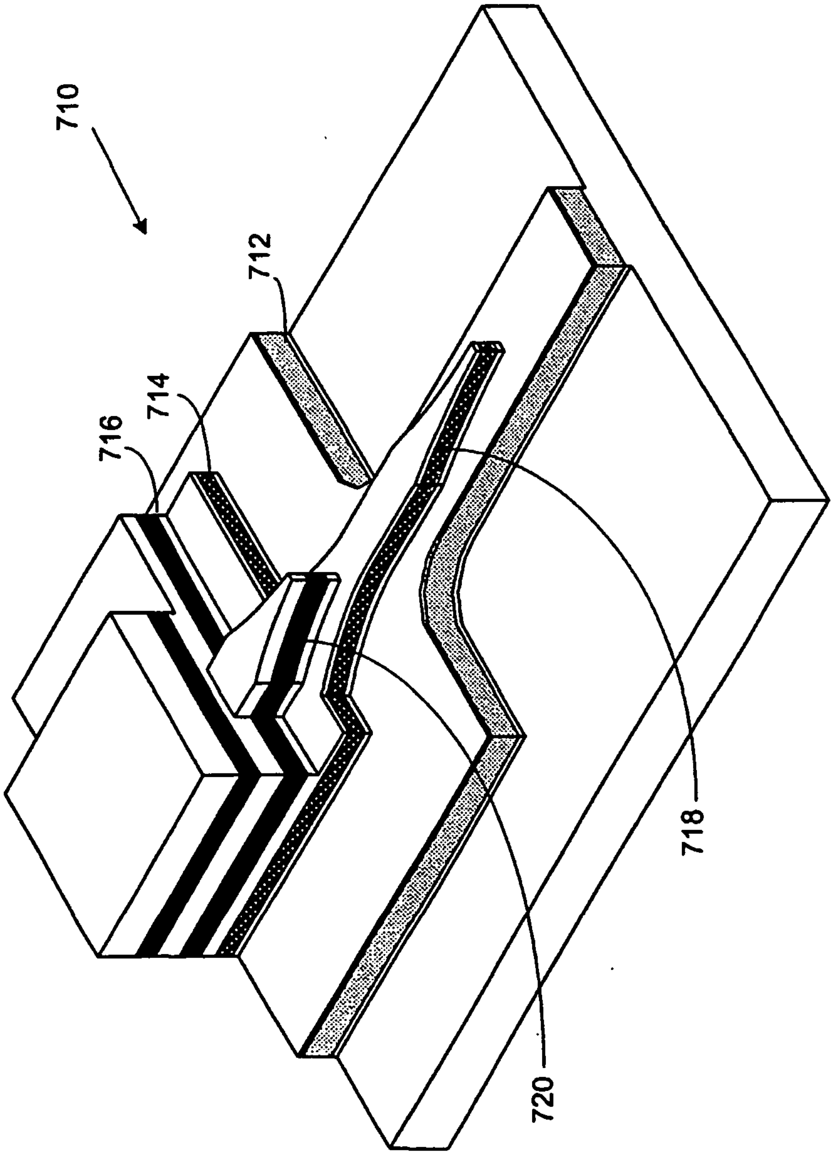


FIG. 7

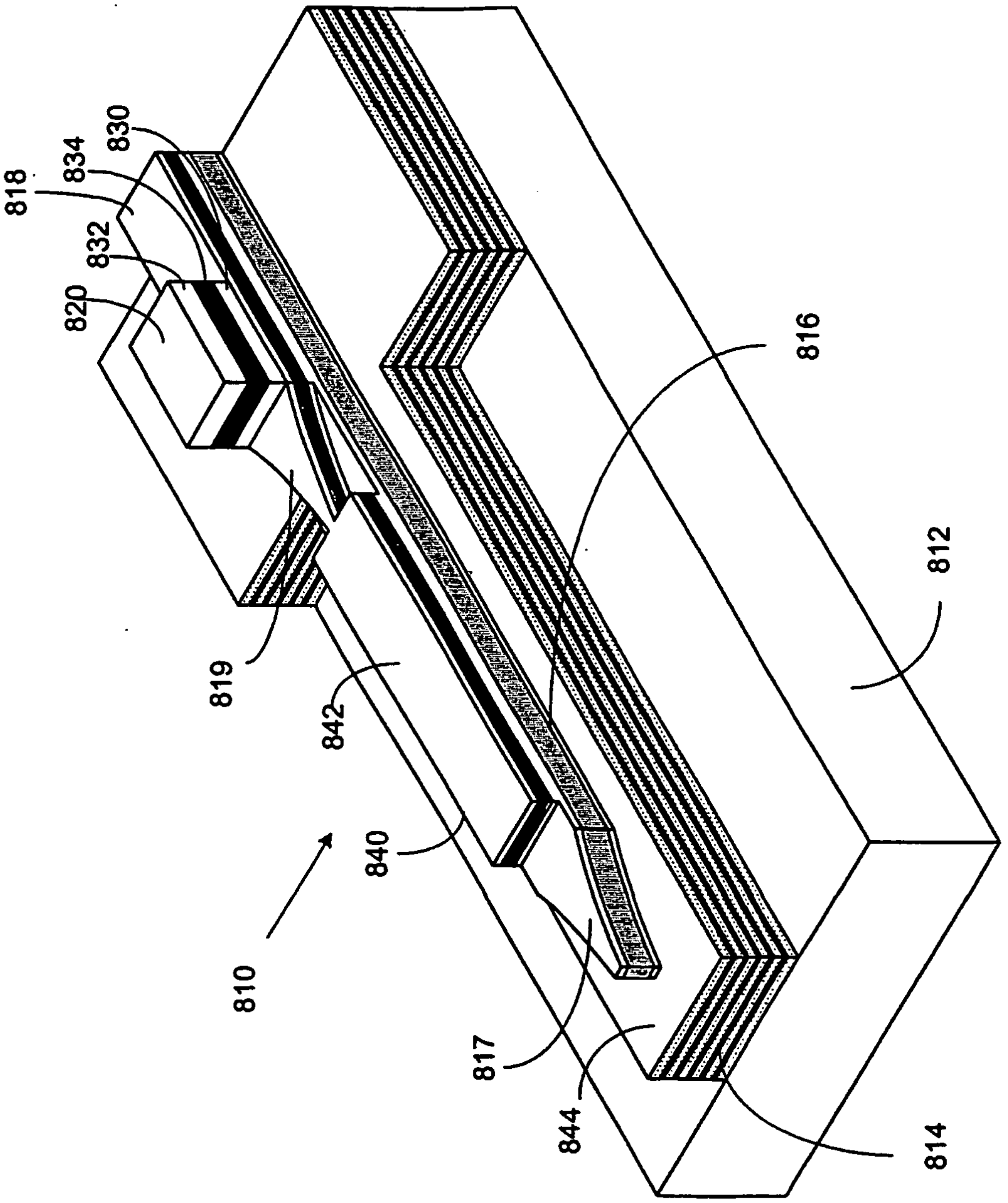


FIG. 8

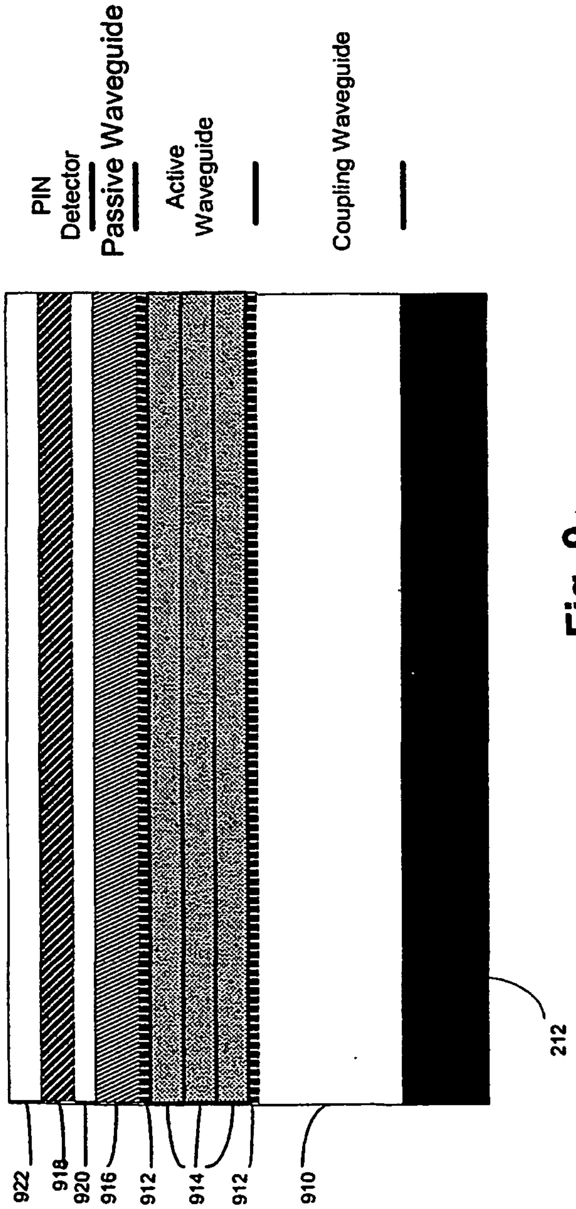

PIN
Detector
Passive Waveguide
Active
Waveguide
Coupling Waveguide

Fig. 9

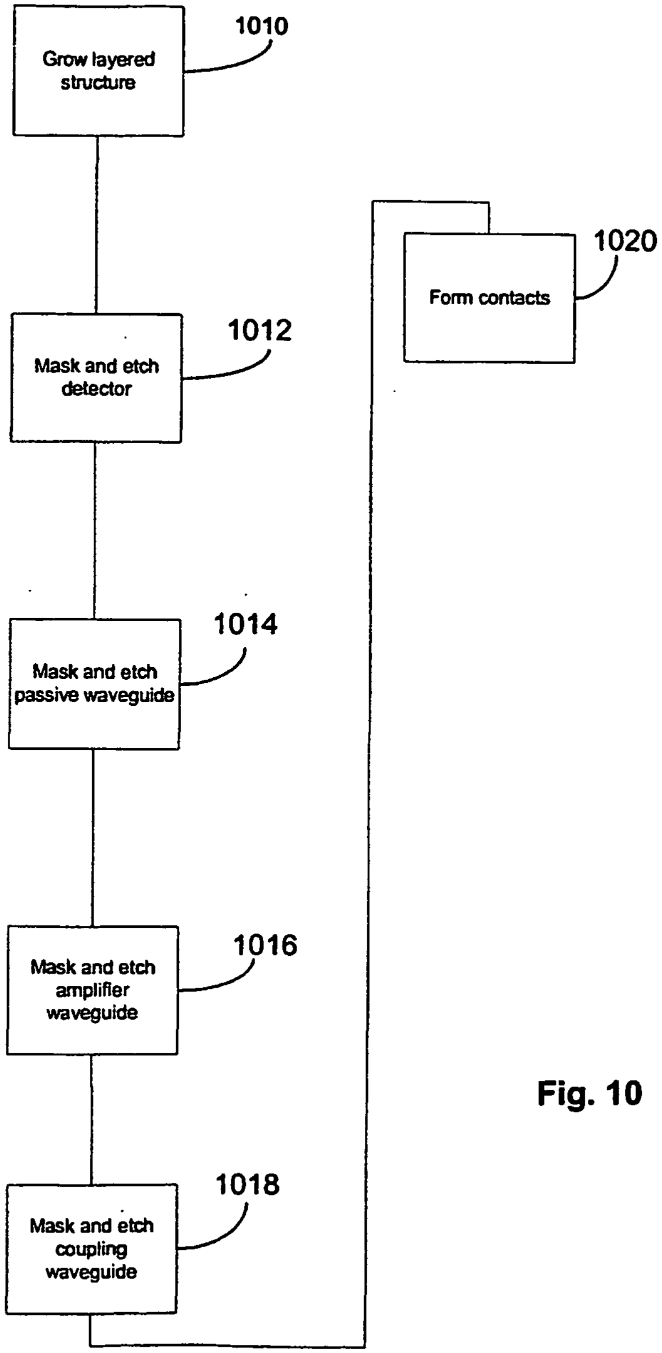

Grow layered structure
1010
Form contacts
1020
Mask and etch detector
1012
Mask and etch passive waveguide
1014
Mask and etch amplifier waveguide
1016
Mask and etch coupling waveguide
1018

Fig. 10

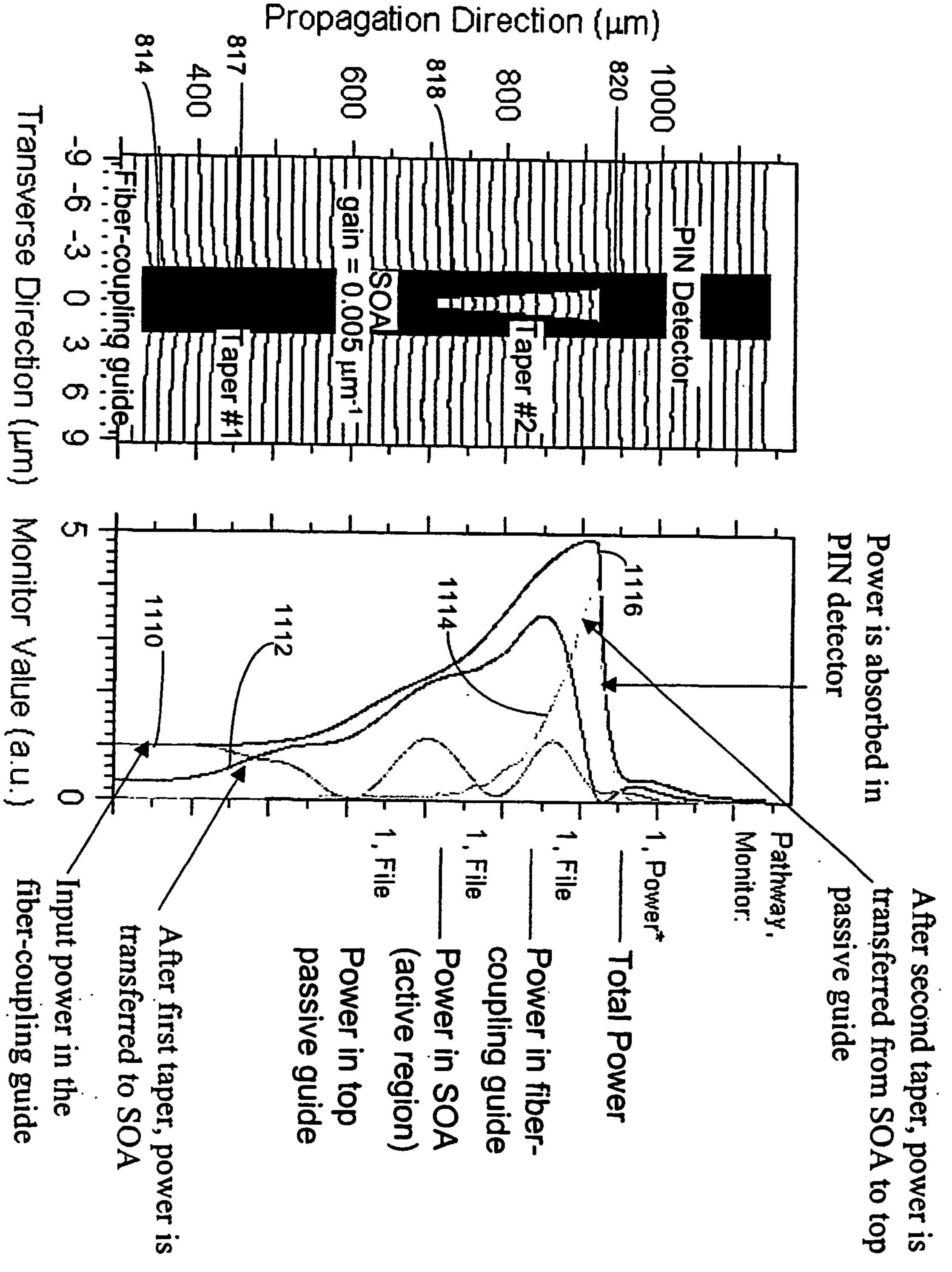

Propagation Direction (µm)
1000
800
600
400
814
817
818
820
PIN Detector
Taper #2
SOA
gain = 0.005 µm⁻¹
Taper #1
Fiber-coupling guide
-9 -6 -3 0 3 6 9
Transverse Direction (µm)
5
0
Monitor Value (a.u.)
1110
1112
1114
1116
Power is absorbed in PIN detector
After second taper, power is transferred from SOA to top passive guide
Pathway, Monitor:
1, Power*
Total Power
1, File
Power in fiber-coupling guide
1, File
Power in SOA (active region)
1, File
Power in top passive guide
After first taper, power is transferred to SOA
Input power in the fiber-coupling guide

Fig. 11

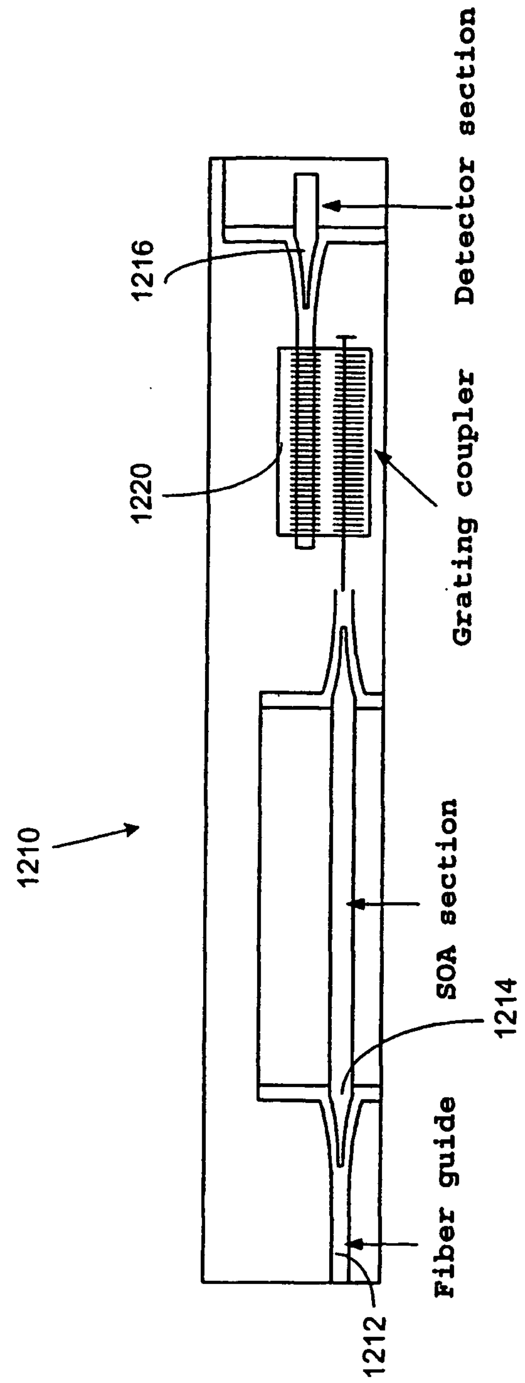

Detector section
1216
1220
Grating coupler
1210
SOA section
1214
Fiber guide
1212

FIG. 12

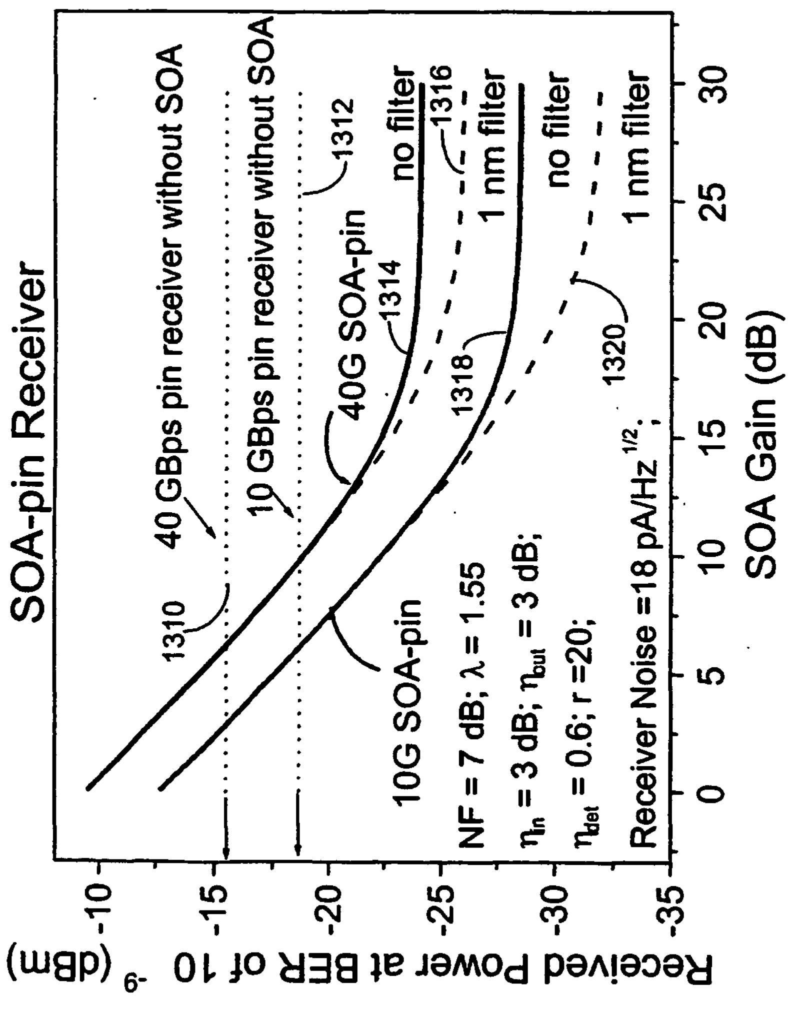

SOA-pin Receiver
40 GBps pin receiver without SOA
10 GBps pin receiver without SOA
1310
1312
40G SOA-pin
1314
no filter
1316
1 nm filter
1318
no filter
1320
1 nm filter
10G SOA-pin
NF = 7 dB; λ = 1.55
η_{in} = 3 dB; η_{out} = 3 dB;
η_{det} = 0.6; r =20;
Receiver Noise =18 pA/Hz$^{1/2}$;
Received Power at BER of 10^{-9} (dBm)
-10
-15
-20
-25
-30
-35
0
5
10
15
20
25
30
SOA Gain (dB)

FIG. 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/US01/14756

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC(7) : G02B 6/10, 6/12, 6/20, H01S 5/32
US CL : 385/14, 28, 29, 30, 37, 42, 43, 50, 131; 372/50
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
U.S. : 385/14, 28, 29, 30, 31, 32, 37, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 131; 372/20, 43-50, 96, 97, 102; 359/344

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
NONE

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
NONE

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A,E	US 6,240,233 B1 (WEINERT et al) 29 May 2001 (29.05.2001), see entire document.	1-40
A	US 5,985,685 A (LEALMAN et al) 16 November 1999 (16.11.1999), see entire document, especially figs. 1 and 5e.	1-40

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

*	Special categories of cited documents:		
"A"	document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T"	later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E"	earlier application or patent published on or after the international filing date	"X"	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L"	document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y"	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O"	document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means		
"P"	document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"&"	document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 30 June 2001 (30.06.2001)	Date of mailing of the international search report 31 July 2001
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703) 305-3230	Authorized officer Hemang Sanghavi Telephone No. (703) 308-0956